HAL
open science

Comparaison de différentes approches numériques dans l'analyse des phénomènes d'instabilité de type fontis

Nicolas Poirot, Sadjia Kecili-Laouafa, Farid Laouafa

To cite this version:

Nicolas Poirot, Sadjia Kecili-Laouafa, Farid Laouafa. Comparaison de différentes approches numériques dans l'analyse des phénomènes d'instabilité de type fontis. 18. Congrès Français de Mécanique (CFM'07), Aug 2007, Grenoble, France. pp.6. ineris-00973262v2

HAL Id: ineris-00973262

https://ineris.hal.science/ineris-00973262v2

Submitted on 10 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.

Comparaison de différentes approches numériques dans l'analyse des phénomènes d'instabilité de type fontis

Nicolas Poirot, Sadjia Kecili-Laouafa & Farid Laouafa

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
Direction des Risques du Sol et du Sous-sol
Parc technologique ALATA
BP n°2 - F 60550 Verneuil-en-Halatte
France
nicolas.poirot@ineris.fr

Résumé :

Au voisinage d'anciennes exploitations souterraines situées à faible profondeur, peuvent apparaître des ruptures à la surface du sol se caractérisant par des cratères appelés fontis. Dans l'objectif de l'aménagement du territoire, il est nécessaire de prédire l'éventuelle survenue et les conséquences de ce type de phénomène. Au vu de la complexité du problème, les méthodes analytiques montrent en général rapidement leurs limites. Les méthodes numériques sont, quant à elles, plus performantes. Cependant, ces dernières nécessitant un grand nombre de données dont l'information n'est que partiellement accessible peuvent conduire à des résultats et conclusions erronés. C'est pourquoi, une approche semi-analytique a été développée. La comparaison des résultats obtenus par cette approche à ceux issus des calculs par éléments finis sur un cas réel montre que la méthode est pertinente.

Abstract :

In the vicinity of old shallow underground mining works, failures may appear on surface with development of craters called sinkholes. In the regional planning program, it is necessary to predict the probability of occurrence of this type of phenomenon as well as its consequence. Considering the complexity of the problem, the analytical methods appear generally unsufficient. The numerical methods are, as for them, more powerful. However, they require a great number of data that are only partially accessible, which can lead to erroneous results and conclusions. This is why, in order to circumvent these difficulties, a semi-analytical approach was developed. The comparison of the results obtained by this approach with those resulting from calculations by finite elements on a real case shows that the method is relevant.

Mots-clefs : fontis ; modélisations numériques ; approche analytique

1 Introduction

Sur l'ensemble du territoire national, l'extraction des différentes ressources minérales souterraines, issues de mines ou de carrières a conduit à la création puis à l'abandon de nombreuses cavités souterraines. Dans l'objectif de l'aménagement du territoire, la question de l'état et de l'évolution de la stabilité de ces vides souterrains ainsi que des conséquences d'un éventuel effondrement sur des ouvrages ou des infrastructures avoisinantes devient primordial. L'expérience acquise dans le domaine révèle que plusieurs types de rupture peuvent être induits par des cavités souterraines. Parmi les nombreuses sources conduisant à la rupture, nous nous intéressons uniquement à un phénomène de rupture se caractérisant par un effondrement localisé (de faible extension) de la surface du sol, classiquement nommé fontis (fig.1).

2 Problématique du fontis

Le fontis est un effondrement localisé de la surface du sol apparaissant en général au droit d'anciens travaux souterrains peu profonds (inférieurs à 50 m). Il résulte de la progression ascendante d'un éboulement initié au sein de travaux souterrains.

Le phénomène de fontis s'initie par une chute de toit, c'est-à-dire une rupture du (ou des) premier(s) banc(s) rocheux surmontant le vide souterrain (fig.1 et 2). Le plus souvent, ce désordre précurseur se rencontre au niveau des carrefours de galeries, où la portée est la plus grande. Puis, à leur tour et selon la nature du recouvrement, les bancs rocheux supérieurs rompent successivement suite à leur incompétence à supporter l'excédent de sollicitation du à la redistribution du champ de contrainte. Le toit de la cavité souterraine remonte et prend une forme de voûte, appelée cloche de fontis. Le développement du vide adopte en général une forme de cheminée verticale de diamètre sensiblement constant. Enfin les ruptures des bancs se développant, l'éboulement souterrain continue à remonter et finit par déboucher en surface, à condition que les matériaux foisonnés venant combler le vide n'aient pas conduit (par auto-comblement) à l'arrêt du processus. La venue au jour de cette cavité donne alors naissance à un cratère appelé fontis qui prend en général, une forme plus ou moins circulaire, dont le diamètre et la profondeur dépendent des caractéristiques des terrains de recouvrement et des dimensions initiales des cavités souterraines.

FIG. 1 – Exemple de formation d'un fontis au ciel d'une carrière (à gauche). Venue au jour (à droite).

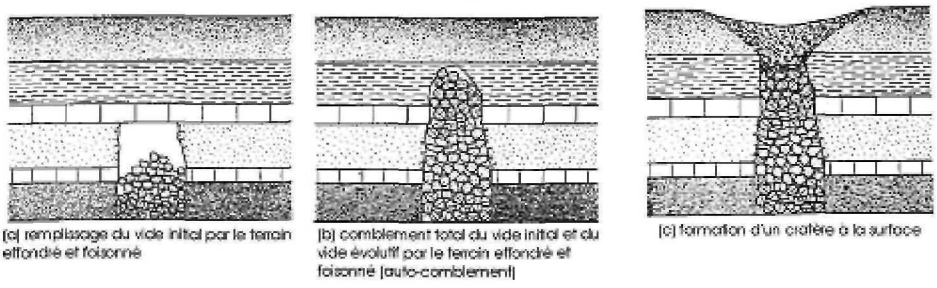

FIG. 2 – Schématisation de la cinétique de formation d'un fontis débouchant au jour

L'expérience acquise montre que l'occurrence de fontis au droit des cavités souterraines dépend également de nombreux autres paramètres géométriques et géomécaniques (la hauteur du recouvrement, les caractéristiques des joints de discontinuité, la hauteur de la couche exploitée, le coefficient de foisonnement de chaque couche, l'histoire des sollicitations thermo-hydro-mécanique que le site a subi, la dégradation des propriétés mécanique avec le temps (vieillissement), etc.). Le phénomène apparaît donc manifestement complexe et la qualification de la prédisposition d'un site à développer des fontis n'est pas aisée. Néanmoins, plusieurs méthodes sont mises en œuvre pour tenter d'apprécier la prédisposition d'un site à développer de telles ruptures.

3 Méthodes analytiques et numériques utilisées dans l'analyse des fontis

3.1 Méthodes analytiques

Parmi les méthodes analytiques, on citera la méthode la plus simple ; l'approche dite volumique qui se contente de comparer le volume disponible au fond (au sein des travaux souterrains) au volume (pondéré par un coefficient de foisonnement supérieur à 1) des matériaux devant s'y ébouler pour que puisse naître un désordre de type fontis en surface. Si le volume au fond n'est pas suffisant pour accueillir le volume de matériaux éboulés, alors la survenue d'un désordre de type fontis est supposée impossible. Cette méthode présente l'intérêt de nécessiter peu de connaissance sur le milieu et donc d'être aisée à mettre en œuvre. En revanche en occultant toute composante mécanique du phénomène, elle s'avère très sécuritaire et ne permet pas de nuancer la prévision.

Les méthodes analytiques, qui intègrent une composante mécanique s'inscrivent dans le cadre de la théorie des plaques, poutres et coques. Parmi ces dernières (Courbon (1955), Mandel (1959), Timoshenko *et al.* (1961)) qui reposent sur de nombreuses hypothèses (l'élasticité linéaire, par exemple), nous citerons uniquement deux analogies simples : celle de la poutre élastique doublement encastrée soumise à un chargement uniforme q perpendiculaire à cette dernière et celle d'une plaque ou dalle élastique chargée dans son plan et reposant sur plusieurs appuis. Le domaine de validité de telles approches est relativement bien défini et est conditionné par de nombreuses hypothèses (rapport épaisseur sur longueur, linéarité, sollicitation statique ou dynamique, nature des appuis, etc.). Or, il a été montré sur quelques cas simples (Laouafa *et al.* (2005)) que la distribution (pour certains plans) des sollicitations induites par l'excavation perd son uniformité et que l'intensité des sollicitations ainsi que leur distribution spatiale dans le massif est de nature complexe. Par conséquent, les hypothèses requises par les méthodes analytiques sont rarement respectées. Les méthodes analytiques bien qu'aisées à mettre en œuvre n'apportent qu'une réponse partielle et parfois erronée. Ces approches demandent donc souvent à être complétées par des méthodes numériques plus raffinées palliant certaines des insuffisances des approches analytiques.

3.2 Méthodes numériques

Parmi les méthodes, les plus couramment employées, on citera : les modélisations aux éléments finis (EF), les modélisations aux différences finies (DF) et les approches semi-analytiques. Si les deux premières approches sont largement répandues, la troisième constitue une voie originale suivie et développée à l'INERIS pour répondre à la problématique considérée. Il s'agit notamment d'une approche qui a débouché sur la mise au point du logiciel PRF2P, (Abass (2004), Al Heib (2001)). Cette approche a été développée en considérant un milieu (représentatif d'un recouvrement type) constitué de plusieurs strates, tel que celui représenté sur la figure 3 ci-dessous. L'approche s'appuie sur de nombreuses hypothèses (joints lisses entre les strates, distribution uniforme due au poids propre, etc. Abass (2004, 2005)). En supposant que l'intensité de la contrainte normale s'exerçant sur la partie supérieure d'une strate est indépendante de l'abscisse x considérée, l'équilibre partiel d'une strate n conduit à :

$$P_{n+1} = P_n + \gamma_n H_n + \delta P_n$$

Expression dans laquelle γ_n, H_n et δP_n désignent respectivement le poids volumique du matériau de la couche n, l'épaisseur de la couche n et l'incrément (variation) de sollicitation qui est fonction des déformabilités ou des raideurs des couches n et n+1 (fig.3).

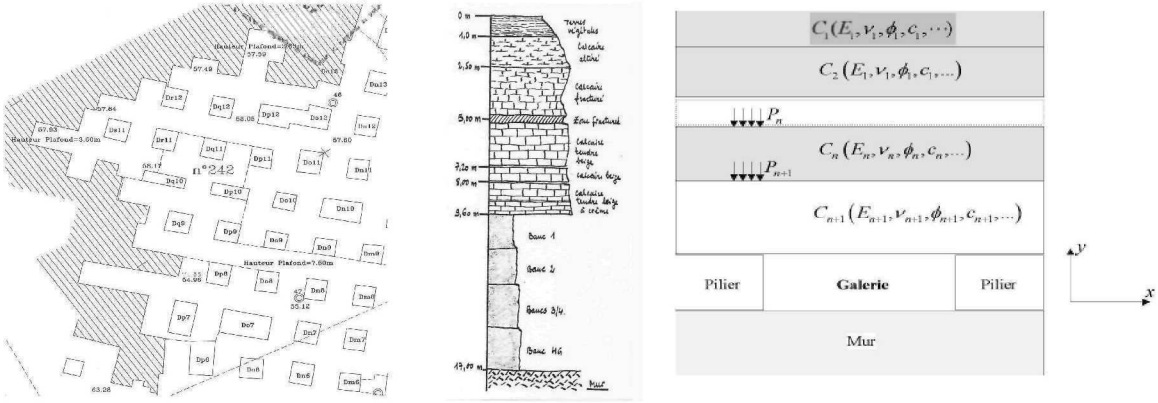

FIG. 3 – Vue en plan d'une carrière souterraine et coupe lithologique du recouvrement (à gauche). Coupe schématique du recouvrement stratifié utilisé dans la construction du modèle numérique PRF2P (à droite).

La contribution mécanique des poutres contenue dans la variable δP_n est fonction de la rigidité flexionnelle des strates, des déplacements verticaux de ces dernières et, naturellement, des conditions cinématiques que l'on impose aux interfaces (décollement autorisé ou non). Les interfaces ont été supposées parfaitement lisses et, par conséquent, aucun effort de cisaillement n'existe. En considérant l'ensemble des strates, le problème à résoudre se ramène à un système d'équations différentielles ordinaires (Mandel (1959)), fondé dans le cadre de la théorie des poutres (Courbon (1955)), et reliant les déplacements aux efforts (sollicitations), de la forme suivante:

$$K_n \frac{\mathrm{d}^4 v_n(x)}{\mathrm{d}x^4} = \gamma_n H_n + \delta P_n(v_n, v_{n+1}, K_n, K_{n+1})$$

Par intégrations successives, on obtient les moments fléchissants, les efforts tranchants, les efforts normaux et les déplacements verticaux (v) dans l'ensemble du massif. Ces variables étant fonction des conditions aux limites définies aux niveaux des appuis, la méthode initiale a été enrichie (Abass *et al.* (2004)) en prenant en compte la déformabilité (compressibilité K_β) corrigée des appuis au niveau de la couche exploitée. Le modèle de comportement actuellement adopté est celui de Mohr-Coulomb avec écrouissage. Au terme des calculs, il est offert la possibilité à l'utilisateur de générer des discontinuités (fractures) dans les zones plastifiées (points matériels situés sur le critère de rupture). Ces fractures (actuellement verticales) transforment des poutres initialement continues portant sur deux appuis (partiellement encastrées) en poutres consoles (poutre devenant libre sur une de leurs extrémités). L'utilisation du code PRF2P est très interactive. Elle nécessite des connaissances et maîtrises en géomécanique et géologie, de manière à rendre l'activation des fissures la plus objective possible. Soulignons qu'un critère basé sur l'énergie de fracturation (classiquement utilisé en mécanique de la rupture) a été intégré. Cependant, la détermination de ce paramètre est illusoire dans le contexte qui est le nôtre. Les approches numériques classiques (éléments finis, différences finies) nécessitent de poser le problème en terme de conditions aux limites, de conditions initiales, et de définir le plus précisément possible les lois d'évolution (généralement non linéaires) de ce problème. Dans le contexte des travaux souterrains, ce préalable ne peut être atteint que partiellement.

3 Comparaison de différentes approches numériques sur un cas

Il s'agit d'une ancienne carrière de calcaire grossier du bassin parisien, exploitée par la méthode des hagues et bourrages. D'après la base de données de l'Inspection Générale des

Carrières de Paris (Vachat (1982)), le fontis venu au jour dans la carrière de Malakoff présentait un diamètre de 2,5 m et une profondeur de 2 m.

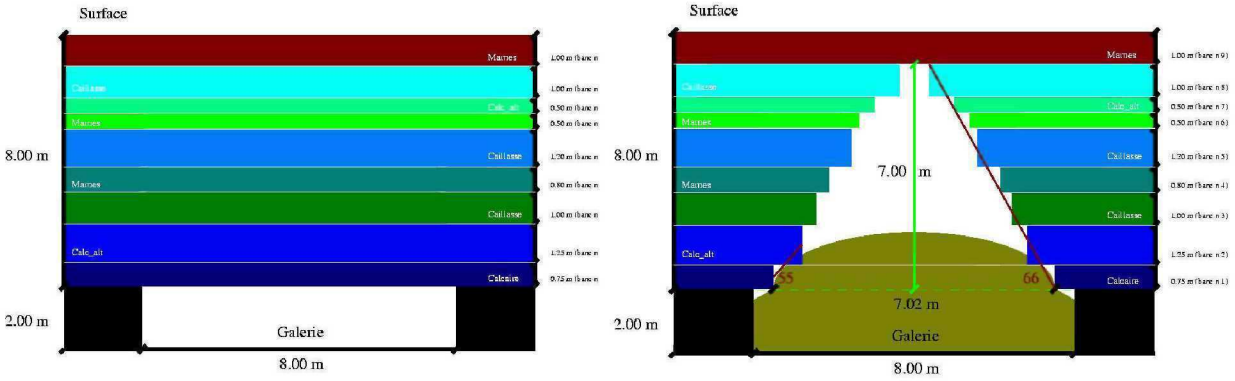

FIG. 4 – Présentation géométrique de la cavité et des matériaux du toit (configuration de la galerie) à gauche. Exemple de remonté de fontis obtenus avec PRF2P.

Le développement du fontis a eu lieu au-dessus d'une galerie de 8 m de largeur et de 2 m de hauteur. Du point de vue lithologique, le recouvrement présente des bancs de calcaire plus ou moins altérés, alternant avec des bancs de marnes et caillasses. La hauteur totale du recouvrement est de 8 m.

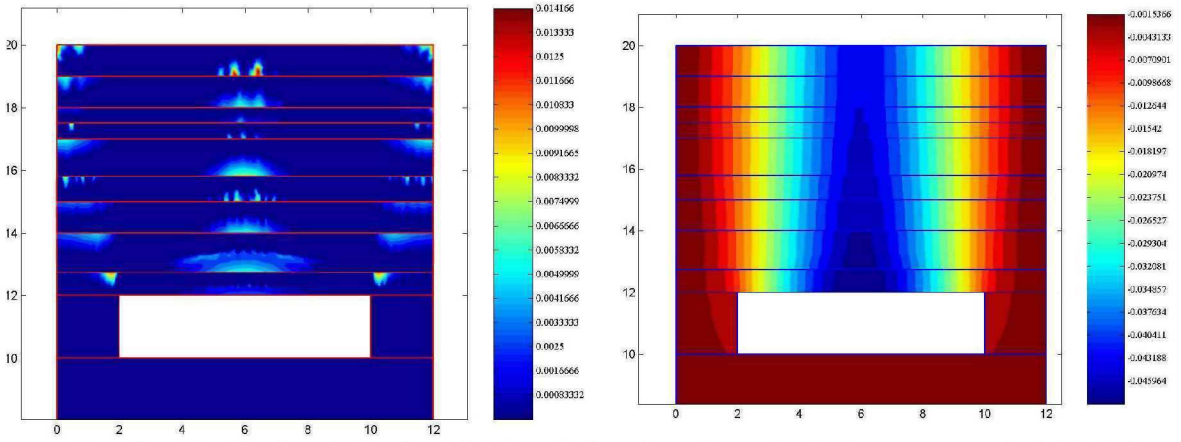

FIG. 5 – Distribution de la plasticité (gauche) et isovaleurs du déplacement vertical (droite). Calculs par éléments finis (EF)

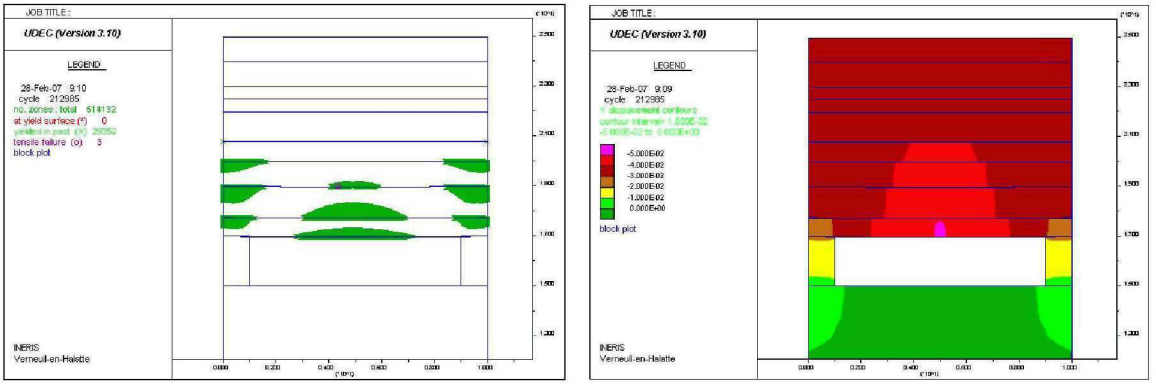

FIG. 6 – Distribution de la plasticité (gauche) et isovaleurs du déplacement vertical (droite). Calculs par différences finis (DF).

Le résultat d'une simulation numérique avec le code PRF2P est présenté sur la figure 4. On constate que l'éboulement est remonté jusqu'au dernier banc (qui n'est pas auto-poteur) constitué d'un matériau très peu résistant. Les modélisations numériques de ce milieu stratifié avec un code aux éléments finis ont été effectuées en adoptant les même paramètres mécaniques et géométriques. Les figures 5 et 6, ci-dessus, illustrent le développement de la plasticité dans le recouvrement ainsi que les isovaleurs du champ de déplacement vertical. Notons que les deux calculs ont convergé. Cela signifie que, numériquement, la configuration est stable. Cependant il appartient aux modélisateurs d'apprécier le degré de stabilité en fonction de la densité, de la distribution de la plasticité et du poids des hypothèses qu'il a effectuées pour mener à bien ces calculs. L'examen de la figure 5 nous conduit à penser (ce qui est le cas) que la configuration est instable est que le fontis se réalisera.

4 Conclusions

L'examen des zones de plastification obtenues par les deux approches (EF et ED) confirment que le recouvrement est affecté par la plastification. Cependant ces deux approches (utilisées dans ce cadre semi-continu) ne parviennent pas à fournir la forme géométrique de la cloche d'éboulement. L'intégration d'algorithme prenant en compte le développement explicite et la propagation de la fracturation, dans ces deux approches, nous semble difficilement réalisable à l'heure actuelle. La difficulté tient beaucoup plus aux incertitudes pesantes sur les conditions initiales du problème. Le logiciel PRF2P (Abass et Al Heib (2005)) permet, sous réserve d'une certaine maîtrise des disciplines telles que la géologie et la géomécanique, d'obtenir des résultats pertinents. L'outil semble prometteur mais des améliorations sont toutefois envisagées. Elles concernent la prise en compte du cisaillement entre les strates. Des travaux sont également menés sur l'établissement ou la définition d'un critère de rupture automatique (activation de fissure).

Références

Abass Fayad A., Al Heib M., 2005. Une nouvelle méthode de prédiction de fontis grâce à une modélisation par poutres plastiques. *Revue Européenne de Génie Civil*, vol. 9, n° 9-10, pp. 1067-1093.

Abbass Fayad A., 2004. *Etude de stabilité de fontis au toit des carrières souterraines et traitements apportés aux conséquences induites en surface*. Thèse doctorat, INPL, Ecole des mines de Nancy, France.

Abbass Fayad A., 2004. *Manuel d'utilisation du code Logiciel de Prévision des Fontis par Poutre Plastiques PRF2P*. Rapport INERIS. Réf : INERIS-DRS-04-45828/RN04.

Al Heib M., 2001. *Effets et conséquences des mouvements du sous-sol sur le bâti. Synthèse des principales méthodes de prévention et de protection*. Référence INERIS-DRS-01-25315RN01.

Courbon, J., 1955. *Cours de résistance des matériaux*. Dunod.

Mandel, J., 1959. Les calculs en matière de pressions des terrains. *Ed La Loire* Républicaine, 16 pl. Jean-Jaurès – Saint Etienne – France.

Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S., 1961. *Théorie des plaques et coques*. Librairie Polytechnique CH. Béranger.

Vachat J.C., 1982. *Les désordres survenant dans les carrières de la région parisienne*. Mémoire diplôme Ingénieur CNAM. Paris.