

Prise en compte des incertitudes et calcul de probabilité dans le domaine des risques liés au sous-sol – application à la carrière souterraine de Grozon

Maxime Cauvin

LAEGO - INERIS – Ecole des Mines de Nancy – Parc de Saurupt – 54042 Nancy Cedex

RESUME. Afin d'apporter des réponses aux demandes actuelles d'homogénéisation des méthodes d'analyse des risques et de quantification des aléas, nous proposons de présenter et d'évaluer les apports que peuvent fournir les outils probabilistes aux études de risques liés au sous-sol. Nous montrons que la prise en compte des incertitudes peut permettre d'améliorer la prévision de l'occurrence spatiale des effondrements de terrain. Nous montrons également que des modèles peuvent être construits pour estimer la probabilité d'occurrence temporelle de tels événements. L'approche développée s'appuie sur l'exemple concret de l'analyse de l'aléa « fontis » au droit de la carrière souterraine de Grozon (Jura), ayant fait l'objet depuis le début de son exploitation de plusieurs effondrements de terrain.

MOTS-CLÉS : Incertitudes, méthodes probabilistes, aléas liés au sous-sol.

ABSTRACT. This paper aims at presenting and evaluating the answers that probabilistic methods can bring to questions linked to the taking into account of uncertainties into risk analyses related to underground problems as well as to the forecasting, in a quantitative way, of the spatial and temporal occurrences of surface collapses. The study is based on the practical example of a sinkhole hazard analysis led in the underground gypsum quarry located in Grozon (Jura) where dozen of sinkholes occurred since the beginning of mining.

KEYWORDS : Uncertainties, probabilistic methods, hazard related to underground problems.

1. INTRODUCTION

Les études de risques concernant les anciennes exploitations souterraines sont traditionnellement réalisées en France de manière purement qualitative. Dans les Plans de Prévention des Risques Naturels ou Miniers, l'aléa est par exemple exprimé sous forme de classes qualitatives : faible, moyen ou fort. Dans ce cadre, les approches probabilistes peuvent alors apparaître aujourd'hui intéressantes. Elles semblent en effet particulièrement adaptées à ce domaine où le poids de l'incertain est évident (Baecher *et al.*, 2003). Elles pourraient également permettre de répondre aux demandes pressantes du public et de l'administration visant à une quantification des risques et à une homogénéisation des analyses avec celles menées pour d'autres aléas naturels (crues, avalanches, etc.).

Cet article vise à présenter et évaluer les multiples réponses que peuvent apporter les méthodes probabilistes aux questions relatives à la prise en compte des incertitudes dans les études de risques liés au sous-sol, ainsi qu'à la prévision sous forme quantifiée de l'occurrence spatiale et temporelle des effondrements de terrain. Pour illustrer les différents résultats, une étude pilote a été réalisée sur le site de la carrière souterraine de gypse de Grozon (Jura). Le but de cette étude est d'analyser la répartition spatiale et temporelle des fontis et d'en tirer des conclusions quant aux futures occurrences

d'effondrements. Le choix de la carrière s'explique pour des raisons à la fois d'accessibilité, de connaissances puisque celle-ci a fait l'objet de plusieurs études (Didier *et al.* (1999), Trebucq *et al.* (2001)), mais aussi de disponibilité de données puisque plusieurs dizaines d'effondrements ont et continuent d'affecter la surface depuis le début de l'exploitation.

2. DESCRIPTION DU SITE : LA CARRIERE SOUTERRAINE DE GROZON

La carrière de Grozon se situe dans le département du Jura (39) à quelques kilomètres au nord de la commune de Poligny. L'exploitation s'est tenue sous une butte, globalement orientée Nord-Sud, située au sein d'une zone plissée composée de formations datant du Trias et du Jurassique (-205 à -150 Ma environ). Le log stratigraphique du gisement et des bancs du recouvrement fait apparaître des alternances de gypse, de marnes, de dolomie et de calcaire (figure 1). En terme d'hydrogéologie, le gisement de gypse est séparé des nappes phréatiques, présentes au sein du calcaire à gryphées et du calcaire lithographique du Rhétien, par environ 18 m de marnes imperméables. De manière générale, les galeries de la carrière sont sèches et aucune venue d'eau n'a été observée récemment au fond.

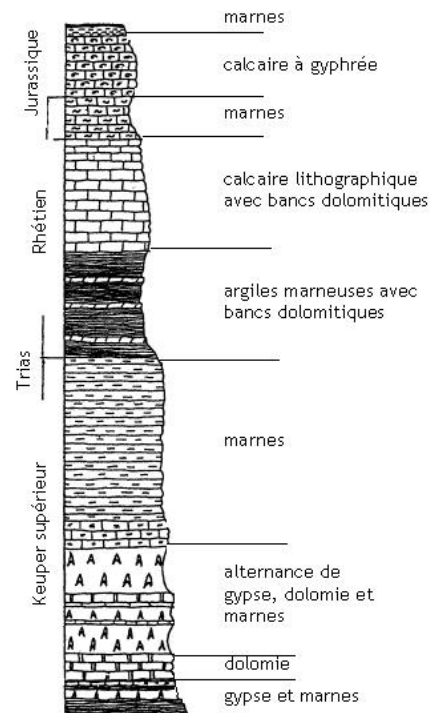


Figure 1. Coupe stratigraphique des terrains.

Le matériau extrait provient d'un ensemble de trois couches de gypse séparées par de minces alternances de dolomie et de marnes gypseuses. Sur ces trois veines, seules deux ont été exploitées, généralement sur un seul niveau mais parfois également sur deux niveaux superposés. L'exploitation a débuté à la fin du 19^{ème} siècle par le versant ouest de la butte et s'est poursuivie vers l'est en s'enfonçant sous celle-ci. Les carriers ont de tout temps utilisé la méthode des « chambres et piliers abandonnés », laissant en place des piliers de gypse de manière à assurer la stabilité du site. Le schéma de dimensionnement a malgré tout largement évolué au fil des années : le traçage est devenu de moins en moins désordonné, les dimensions de piliers et des galeries de plus en plus régulières au fur et à mesure de l'approfondissement des travaux.

De par la nature des matériaux rencontrés, la géomorphologie du site et le schéma d'exploitation, différents types d'instabilités ont pu être rencontrés au fond (ruptures de piliers, chutes de toits, montées de voûte (figure 2.a), soufflage du mur (figure 2.b)), provoquant en surface l'apparition de cuvettes d'effondrements (figure 2.c) ou d'affaissements (Trebucq *et al.*, 2001). De manière à mieux appréhender et gérer le risque d'instabilité en surface, une analyse fut confiée à l'INERIS en 1996 utilisant la méthode dite des « configurations types » (Didier *et al.*, 1999).



Figures 2.a. Montée de voûte, 2.b. Soufflage du mur, 3.c. Cuvette de fontis en surface.

3. ANALYSE SPATIALE DE L'OCCURRENCE DES FONTIS

3.1. PRESENTATION DES DONNEES

Un travail de levé de terrain par GPS a été effectué en septembre 2006 sur une superficie d'environ 15ha, dans les zones situées à flanc de coteau ou en bordure de dalle calcaire de surface, particulièrement concernées par le phénomène de fontis puisque l'exploitation y est peu profonde (10 à 50m) (Didier *et al.*, 1999). Ce travail a ensuite été complété par l'analyse de plusieurs jeux de photographies aériennes. Au total, trente-cinq cuvettes d'effondrement, d'un diamètre de 3 à 5 mètres, ont ainsi pu être repérées et localisées (figure 3.a). Un modèle spatial a alors été réalisé, découpant la zone investiguée en 246 mailles de 25m x 25m. Chaque maille a été caractérisée par diverses informations : nombre de couches exploitées, dimensions des travaux, date d'exploitation (figure 3.b), profondeur des travaux (figure 3.c), nombre de carrefours de galeries présents, nombre de fontis observés. On notera que le paramètre 'date d'exploitation' a permis de caractériser l'irrégularité et la variabilité du dimensionnement des travaux. Des plages de variations ont ainsi pu être définies pour les dimensions des piliers et galeries en fonction des différentes périodes d'exploitation.

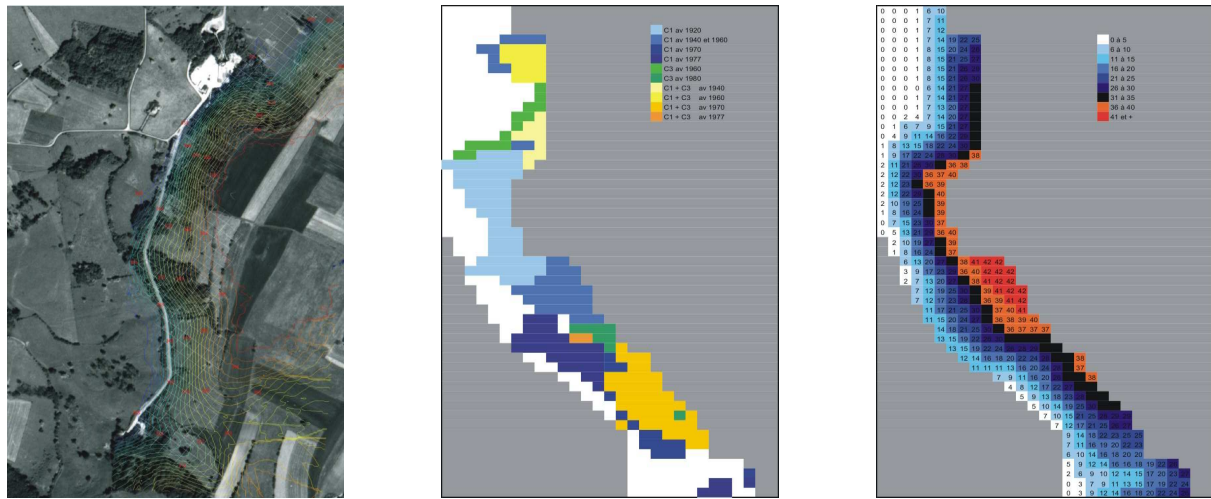
3.2. ETUDE DE L'ALEA « FONTIS »

Compte-tenu de la nature des matériaux en place et des faibles profondeurs d'exploitation, il est fortement présumé que le mécanisme de *fontis* soit responsable des nombreuses cuvettes observées en surface. Pour analyser l'aléa lié à un tel phénomène sur la zone étudiée, la démarche retenue comporte deux phases. La première consiste à étudier la potentialité d'une rupture du toit de la carrière déclenchant au fond le mécanisme de formation de la cloche de fontis. La seconde phase s'intéresse à la capacité de la remontée de voûte à atteindre la surface sans que le fontis ne s'auto-comble.

3.2.1. Analyse déterministe

De manière à étudier le mécanisme d'initiation au fond des fontis, un modèle de flexion de plaque a été choisi. La « plaque » étudiée correspond au premier banc du toit formant un carrefour de galeries et a été supposée continue. Le mode de rupture étudié est une rupture en traction au centre de la plaque

due au fléchissement de celle-ci. Pour déterminer la potentialité d'une rupture, le rapport (noté A) entre la somme de la résistance à la traction et la contrainte horizontale, et la contrainte en traction a été étudié. Avec ce modèle simple, plus A est petit et plus l'initiation du fontis est probable.



Figures 3.a. Maillage et position des fontis, 3.b. Configurations d'exploitation, 3.c. Topographie.

De manière à étudier le mécanisme de remontée de voûte, l'approche volumétrique développée par l'INERIS a été utilisée, permettant d'estimer la hauteur de remontée du fontis jusqu'à son auto-comblement en fonction des dimensions de l'exploitation et de facteurs liés aux différents matériaux (angle de talus, coefficient de foisonnement). Cette hauteur de remontée de fontis est ensuite comparée à la profondeur des travaux (Didier *et al.*, 2004).

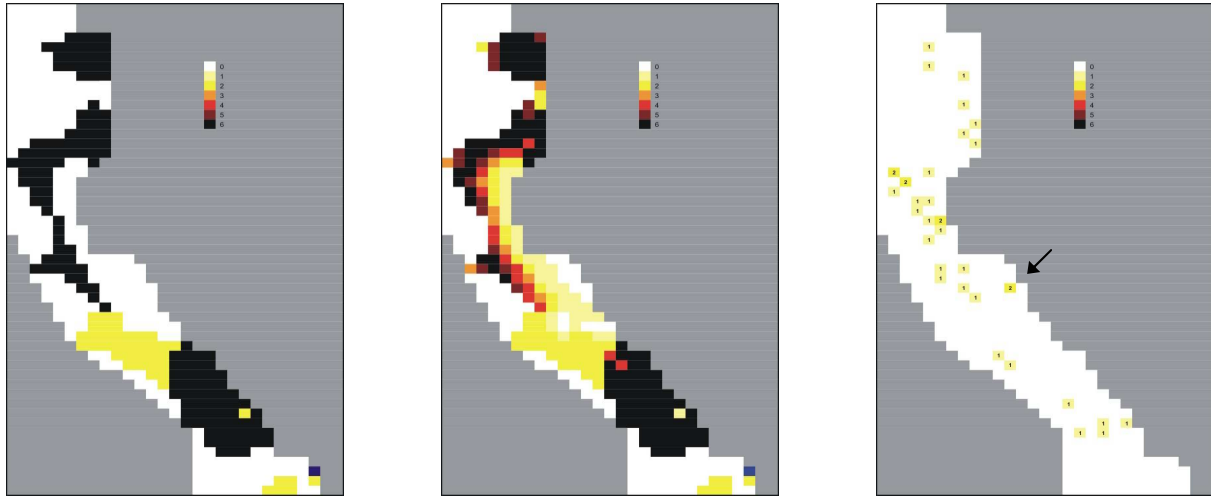
Du fait des surfaces portantes du toit importantes (portées de l'ordre de 6m), le rapport A est petit devant 1 quelque soit la configuration d'exploitation. L'initiation des fontis est alors très probable sur toute l'étendue de la carrière de Grozon. Le calcul volumétrique montre quant à lui que l'auto-comblement des cloches de fontis apparaît pour des épaisseurs de recouvrement d'environ 30m. L'aléa lié au phénomène de fontis serait alors nul en haut de la butte. Une carte d'aléa, indiquant le nombre de fontis pouvant apparaître au jour (égal au nombre de carrefours de galeries existants au fond), a ainsi pu être réalisée utilisant les données du modèle spatial (figure 4.a).

3.2.2. Analyse probabiliste

Compte-tenu des incertitudes existant sur les paramètres d'entrée des modèles, les évaluations de A et de la hauteur de remontée de fontis sont imprécises. Pour refléter cette variabilité, chaque paramètre peut alors être défini sous forme d'une fonction de distribution, puis, utilisant les simulations de Monte Carlo, une probabilité de dépassement de seuil (probabilité que A soit supérieur à 1, probabilité que la hauteur de remontée de la voûte soit supérieure à la profondeur des travaux) peut être estimée. Cette valeur probabiliste peut s'interpréter comme un *facteur de correction* à apporter au nombre de fontis pouvant s'initier au fond et remonter au jour, facteur qui découle du fait les données d'entrée des modèles sont incertaines.

Dans notre étude, compte-tenu de la quantité et de la nature des données disponibles (pas de relevé systématique des dimensions des piliers, peu d'essais mécaniques, etc.), des lois simples (uniformes ou triangulaires) ont été utilisées pour caractériser les paramètres d'entrée. Les paramètres des lois (moyennes, maximum, minimum) ont été déterminés soit directement par mesures sur le terrain, soit

indirectement par jugement d'experts. Des calculs ont ensuite été réalisés pour chaque maille du modèle spatial. Un nombre de fontis pouvant déboucher en surface a ainsi pu être estimé pour chaque maille, en corrigeant le nombre de carrefours de galeries existants au fond par une prise en compte des mécanismes d'initiation de fontis et d'auto-comblement (figure 4.b).



Figures 4.a. Résultats « déterministes », 4.b. Résultats « probabilistes », 4.c. Fontis observés.

3.3. DISCUSSION

La figure 4.c présente la répartition réelle des cuvettes de fontis. En comparant ces observations aux résultats des calculs, il apparaît que le calcul probabiliste permet de prévoir l'occurrence de certains effondrements dans des zones où le calcul déterministe seul concluait à un auto-comblement de la cloche de fontis. On notera que, dans l'analyse autrefois menée par l'INERIS à une échelle beaucoup plus grande, les incertitudes avaient été prises en compte de manière indirecte et toute la zone étudiée avait été considérée comme zone d'aléa moyen (Didier *et al.*, 1999). L'approche développée ici permet d'obtenir une vision spatiale et quantifiée de l'aléa plus précise.

Une question peut se poser quant à l'interprétation pratique des résultats : que signifient vraiment les probabilités calculées ? Doit-on considérer que le nombre de fontis estimé est le nombre réel de fontis qui déboucheront au jour ? En fait, la signification des probabilités dans le cadre de l'analyse de risque apparaît très ambiguë. D'un côté, les probabilités peuvent être utilisées dans un cadre *fréquentiel* pour quantifier l'occurrence d'un événement en un endroit précis dans un laps de temps donné. C'est généralement cette approche qui est souhaitée et attendue par l'administration puisque des renseignements spatio-temporels sont apportés aux décideurs. D'un autre côté, les probabilités peuvent être utilisées dans un cadre *épistémique* pour quantifier l'incertitude existant sur un résultat du fait d'une mauvaise connaissance. Les risques liés au sous-sol s'inscrivent généralement dans ce cadre. Les probabilités calculées doivent alors être regardées comme un complément à l'analyse déterministe qui a été réalisée et qui concerne la *prédisposition* d'un site vis-à-vis d'un type d'aléa.

Dans l'étude présentée, en réduisant l'incertitude sur les données d'entrée, le nombre de fontis prévus pourra être réduit ou augmenté. Ce nombre ne doit alors être vu que comme un nombre ordinal, relatif, uniquement valable en l'état des connaissances et pour les phénomènes modélisés. Ce complément probabiliste permet cependant d'apporter de nouvelles informations. Une comparaison entre les cartes de fontis observés et de prévision probabiliste permet par exemple d'identifier deux

cuvettes (fléchées sur la figure 4.c) dont le comportement semble singulier. Le calcul montre en effet que dans de telles conditions d'exploitation et de profondeur, l'apparition de fontis est très improbable. Les cuvettes pourraient alors résulter d'un mécanisme d'effondrement différent de la remontée de voûte. Des ruptures de piliers, possibles à ces fortes profondeurs, pourraient être à l'origine de ces cuvettes d'un diamètre plus important que les autres cuvettes (environ 8m).

4. ANALYSE TEMPORELLE

4.1. REMARQUES A PROPOS DE L'ANALYSE DE RISQUE

Comme l'indique Durville (2004), l'information apportée par la notion de prédisposition ne peut satisfaire complètement le décideur puisqu'elle n'apporte pas de renseignement quant au facteur temporel de l'aléa. Comment alors prendre des décisions d'urbanisme ou d'aménagement du territoire dans un contexte si incertain dès lors qu'on ignore si le phénomène redouté a le plus de chances de se manifester dans les 10, 100 ou 1000 prochaines années ? Des modèles sont alors nécessaires pour estimer les probabilités d'occurrence d'un aléa *dans un laps de temps donné*. Le plus souvent, ces modèles sont basés sur l'estimation de la fréquence empirique des événements et sur l'hypothèse que les conditions de demain seront les mêmes que celles d'hier. Les crues, les chutes de blocs ou les avalanches par exemple sont des phénomènes qui peuvent être qualifiés de *sans mémoire* puisque deux événements de même intensité peuvent survenir au même endroit et dans un délai très court. De tels phénomènes sont généralement décrits par des modèles basés sur le processus de Poisson et sont caractérisés par la notion de *période de retour*. Il est difficile, pour les aléas liés au sous-sol, de soutenir que le processus est sans mémoire : une fois effondrée, la surface ne pourra plus être affectée par un mouvement de terrain. De nouveaux modèles nécessitent alors d'être construits, soit à une échelle locale, ce qui apparaît difficile tant les mécanismes impliqués sont complexes, soit à une échelle plus globale où c'est de l'événement « *effondrement apparaissant en un point quelconque d'une zone homogène* » qu'il sera alors question.

4.2. ESTIMATION DE LA PROBABILITE D'APPARITION DES FONTIS

L'analyse probabiliste a permis d'identifier certains secteurs sensibles dans lesquels, compte-tenu de l'incertitude des données et du choix des hypothèses, le phénomène de fontis apparaît probable. Un nombre de fontis pouvant déboucher au jour a également pu être estimé compte-tenu de ces mêmes restrictions. Il convient de constater que des différences importantes existent entre les rapports « fontis observés / fontis attendus » pour les différentes configurations d'exploitation (figure 5, points). L'âge de l'exploitation pourrait expliquer ces différences puisque plus les travaux sont anciens, plus ils sont proches de leur état final et donc plus le rapport « fontis observés / fontis attendus » doit être grand.

Si on note T le temps entre la fin de l'exploitation d'un carrefour de galeries et la venue au jour d'un fontis au droit de celui-ci, T peut être considéré comme une variable aléatoire. Pour des raisons liées à une certaine variabilité inhérente à tous les objets naturels, les fontis n'ont en effet pas tous la même durée de vie. Dans une de ses études relatives au développement de fontis en Pennsylvanie, Dyne (1998) estime que T vaut 60 ans en moyenne. Peng (1992), suite à une étude menée sur deux sites miniers, indique que la majeure partie des fontis surviennent dans les 30-40 premières années, que 50% des fontis arrivent dans les 50 ans et que 100% dans les 100 ans. Compte-tenu de ces remarques issues de la littérature, il semble que la loi décrivant la variable « *temps d'apparition des ruptures dans*

une zone où *n fontis peuvent survenir* » peut être décrite selon le modèle suivant : la probabilité d'apparition d'un fontis augmente avec le temps jusqu'à atteindre son maximum environ 50-60 ans après l'exploitation, puis elle décroît par la suite jusqu'à devenir quasiment nulle une centaine d'années après l'exploitation (figure 5, pointillés). Le vieillissement de la carrière provoquera alors au jour une multiplication du nombre de fontis pendant plusieurs dizaines d'années puis une raréfaction de ceux-ci jusqu'à atteindre un palier (figure 5, courbe pleine).

La loi qui a été choisie pour le tracé de la figure 5 est la loi de Weibull, fréquemment utilisée en ingénierie pour caractériser la fiabilité des matériels et qui est définie en fonction de α , paramètre de forme caractérisant la fatigue (ou dégradation) du matériau et β , paramètre d'échelle indiquant le temps *représentatif* de la rupture (ou l'espérance de vie d'un carrefour). Pour la carrière de Grozon, les paramètres α et β ont pu être déterminés par calage et on trouve $\alpha=2,8$ et $\beta=74$ ans.

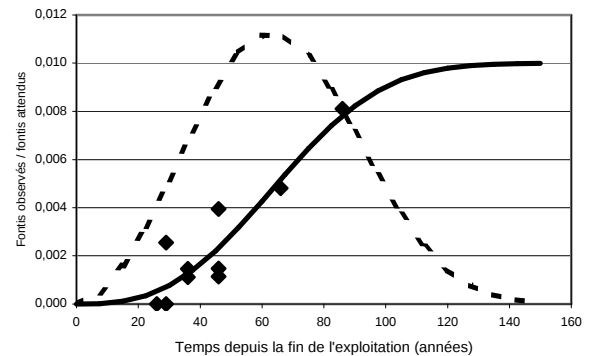


Figure 5. Evolution du nombre de fontis en fonction du temps sur le site de Grozon

4.3. DISCUSSION

Compte-tenu du modèle mis en place, plusieurs conclusions peuvent être apportées. Tout d'abord, l'espérance de vie d'un carrefour (β) peut être estimée à 75 ans. Ensuite, il apparaît que la probabilité d'apparition d'un fontis augmente avec le temps après l'exploitation et est maximale vers 65 ans. Passé ce délai de 65 ans après l'exploitation, la venue au jour d'un fontis est alors moins probable qu'elle ne l'a été auparavant. Enfin, cette probabilité d'apparition d'un fontis peut être estimée dans un intervalle de temps donné après l'exploitation : elle vaut 1% dans les 10 premières années, 8% dans les 30 ans, 50% dans les 65 ans et 98% dans les 120 ans.

Pour chaque configuration d'exploitation, connaissant son âge, il est désormais possible d'estimer la probabilité de survenue de nouveaux fontis dans les prochaines années. On notera que le modèle temporel a été construit en l'état des connaissances du moment. Si, par exemple, cette étude avait été réalisée 10 ans plus tôt, l'ordonnée du point correspondant sur la figure 5 aux travaux des années 1890 aurait sans doute été la même, puisque aucun fontis n'a été recensé depuis plusieurs années dans cette région. L'abscisse du point aurait, quant à elle, été inférieure de 10 ans. Dès lors, l'interpolation par le modèle de Weibull aurait mené à l'estimation d'une espérance de vie plus faible. On notera également que ce modèle temporel a été construit en tenant compte de mécanismes spécifiques correspondant à la situation du moment. Les travaux, séparés des aquifères par 18 m de couches marneuses, ont par exemple été supposés secs. Si des modifications hydrogéologiques venaient à apparaître (infiltrations, fortes précipitations, etc.), les mécanismes considérés ne seraient peut-être pas les plus judicieux, les hypothèses faites dans le raisonnement pourraient s'avérer fausses et de nouveaux modèles devraient alors être mis en place. Dans ce cas, les probabilités changeraient. L'un des résultats importants est, en tout cas, le fait que le niveau d'aléa est amené à changer avec le temps. Passé un certain délai de temps après la fin de l'exploitation, la probabilité de voir un fontis apparaître au jour devient négligeable et l'aléa aussi. Des cartes d'aléas *dynamiques* pourraient alors être envisagées.

5. CONCLUSIONS

La prise en compte des incertitudes dans le domaine de la géomécanique se fait aujourd'hui en France de manière indirecte et qualitative et l'utilisation des probabilités reste encore assez limitée. Malgré tout, il a pu être montré au travers d'un exemple concret que les outils probabilistes présentent plusieurs avantages non négligeables qui peuvent à la fois aider l'ingénieur dans ses analyses de risques et le décideur dans sa prise de décision.

L'utilisation de fonctions de distributions permettant la prise en compte des incertitudes liées à une mauvaise connaissance sur les paramètres d'entrée des modèles, plutôt que de valeurs discrètes, permet de préciser les résultats d'une analyse de risque et d'obtenir des *cartes de sensibilité spatiale*. De là, l'expert et le décideur peuvent par exemple se faire une idée sur la localisation possible des prochains événements. Ils peuvent également, en comparant leurs prévisions à la réalité, se faire une idée de l'état actuel de la carrière et juger si celui-ci semble proche d'un état final. Enfin, l'utilisation des probabilités peut permettre l'identification de nouveaux mécanismes de rupture et ainsi améliorer l'expertise sur un site donné.

Malgré tout, les résultats probabilistes obtenus, qui caractérisent un manque de connaissance vis-à-vis des données, ne semblent pas suffisants dans la pratique pour des propos de gestion de risque où il apparaît important de disposer d'une référence temporelle. Pour intégrer le facteur temps dans les études, des modèles peuvent être construits via une analyse des fréquences des événements passés. Ceux-ci peuvent alors permettre d'estimer des probabilités d'occurrence temporelle des événements. Malheureusement, ce qui a pu être fait à Grozon ne peut que très rarement être fait ailleurs du fait d'un manque de données, d'où une nécessité de construire dès à présent des bases de données d'accidents pour pouvoir un jour établir de tels modèles.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Baecher G.B., Christian J.T. (2003) « *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering* », John Wiley & Sons, Ltd.
- Didier C., Tritsch J.-J., Watelet J.-M., Armangué A. (1999) « Evaluation du risque d'instabilité en surface à l'aplomb d'une ancienne carrière souterraine – principes d'une analyse par configurations types » *Congrès International de Mécanique des Roches*, Paris, France, p. 9-14.
- Didier C., Salmon R. (2004) « Evaluation du risque d'apparition d'un fontis en surface : un modèle volumétrique probabiliste » *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur*, Lille, France, p. 451-461.
- Durville J.-L. (2004) « Quelques remarques sur l'emploi des probabilités dans le domaine des risques naturels – cas des mouvements de terrain » *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 249, mars-avril 2004, réf. 4509, p. 3-17.
- Dyne L.A. (1998) « The prediction and occurrence of chimney subsidence in southwestern Pennsylvania » MSc thesis in Mining and Minerals Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Peng S.S. (1992) « Surface subsidence engineering » Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Colorado.
- Trebucq S., Thoraval A. (2001) « Description des mécanismes d'instabilité dans les carrières de gypse, application particulière au cas de la carrière de Grozon », Rapport de recherche INERIS DRS-01-25310/RN01 pour le compte du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.