

REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE DE LA CONNAISSANCE D'EXPERT DANS LE CADRE DES PLANS DE PREVENTION DES RISQUES MINIERS

Maxime CAUVIN¹, Thierry VERDEL¹, Romuald SALMON², Christophe DIDIER²
1 LAEGO-INERIS, Ecole des Mines de Nancy, Parc de Saurupt, Nancy, France
2 INERIS, Parc technologique ALATA, Verneuil-en-Halatte, France

RÉSUMÉ – Les Plans de Prévention des Risques Miniers ont été développés pour répondre aux problématiques de l'Après-mine d'une manière rapide, opérationnelle et s'appuyant sur la connaissance en l'état, ce qui induit inévitablement l'existence d'incertitudes dans les résultats énoncés. Cet article introduit une démarche et des outils permettant aux experts d'exprimer la confiance qu'ils peuvent avoir vis-à-vis de leur évaluation et de lever les principales difficultés qu'ils rencontrent dans leur travail.

1. Introduction

L'activité minière fut longtemps considérée en France comme un des fleurons de l'industrie nationale, synonyme de prospérité économique et de développement démographique et urbain pour le pays. Aujourd'hui, la situation est toute autre : les principaux sites miniers ont dû fermer du fait de l'épuisement des gisements et de la concurrence internationale, plongeant plusieurs régions dans une crise économique profonde.

De plus, la cessation de l'activité minière n'a pas entraîné la disparition définitive des risques et des nuisances qui en résultaient. Même non exploités, les anciens sites miniers peuvent engendrer des désordres et des nuisances susceptibles de porter atteinte à la sécurité des personnes, des biens et des écosystèmes situés dans l'emprise des anciens travaux. Plusieurs phénomènes sont ainsi à redouter : instabilités des terrains de surface (effondrements, affaissements) pouvant mettre en péril la sécurité des personnes et induire des dommages sur les habitations et infrastructures, mais aussi émissions de gaz potentiellement dangereux ou toxiques, perturbations hydrologiques (inondations de points bas, modification du régime de cours d'eau), rejets dans l'environnement de substances susceptibles d'en dégrader la qualité, etc.

De manière à anticiper ces problèmes et à mieux organiser la reconversion des régions les plus touchées par ces problèmes liés à « l'Après-mine », la France a choisi de mettre en œuvre une politique de prévention systématique des risques en se dotant d'un outil technique et réglementaire particulièrement puissant : les Plans de Prévention des Risques (PPR). Initialement dédiés aux risques naturels (PPRN instaurés par la loi n°95-101 du 2 février 1995), ceux-ci ont rapidement été étendus aux risques miniers (PPRM instaurés par la loi n°99-245 du 30 mars 1999). L'objectif majeur des PPR est d'identifier les risques et nuisances susceptibles d'affecter le territoire et de définir des prescriptions relevant de règles d'urbanisme, d'aménagement du territoire ou d'usage des sols et des eaux (Didier et Leloup, 2005).

2. L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers

Comme fixé par les décrets n°95-1089 du 5 octobre 1995 et 2000-547 du 16 juin 2000, un projet de PPRM doit nécessairement comporter les éléments suivants :

1. une note de présentation indiquant le secteur géographique concerné, la nature et l'importance des risques miniers pris en compte ainsi que la *probabilité de leur survenance* et leurs conséquences possibles compte tenu de l'état des connaissances,
2. un ou plusieurs documents graphiques délimitant les zones à risques,

3. un règlement détaillant de manière claire et concise les mesures d'interdiction et les prescriptions applicables aux biens existants ou futurs, ainsi que les mesures de prévention, de protection, de surveillance et de sauvegarde à mettre en œuvre dans les zones à risques.

De manière à répondre à cette demande réglementaire, les organismes en charge de l'élaboration des PPRM suivent généralement une méthodologie de travail qui se décompose en quatre grandes phases (INERIS, 2004) résumées sur la figure 1.

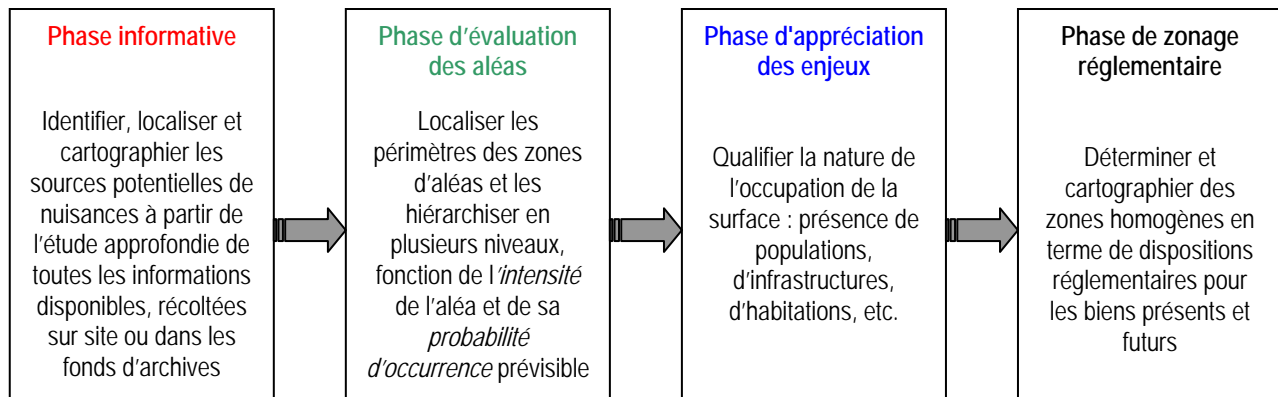


Figure 1. Les quatre grandes phases de l'élaboration d'un PPRM.

3. Identification des principaux problèmes rencontrés lors de la réalisation des PPRM

Comme indiqué en introduction, les PPRM ont été développés dans le cadre d'une politique de prévention systématique des risques. L'un des principaux enjeux de cette politique est de traiter, dans des délais raisonnables et avec des ressources financières et humaines (capacité d'expertise et de gestion administrative des dossiers) limitées, une grande diversité de sites à risques répartis sur l'ensemble du territoire. Ces contraintes ont fortement conditionné l'esprit de mise en œuvre et d'utilisation des PPR. Ceux-ci ont vocation à être des outils *simples* et *opérationnels* destinés à la population et aux services chargés de leur application. Ce parti pris de simplicité et de rapidité implique de se baser sur des approches principalement qualitatives, reposant sur *l'état des connaissances* et *l'avis d'expert*. Il résulte inévitablement de ces choix l'existence d'une marge d'incertitude dans les résultats énoncés.

Le fait de travailler en *l'état des connaissances* implique pour l'expert en charge de la réalisation du PPRM d'être fortement assujéti à la qualité des informations disponibles dans les archives ou sur le terrain. Dans la pratique, ce dernier doit fréquemment faire face à des problèmes liés à la fiabilité des plans d'exploitation dont il dispose (plans incomplets, mal calés par rapport à la surface, etc.), à la nature informelle de certaines données (témoignages oraux, coupures de presse, etc.) ou à la difficulté à analyser et expertiser certains événements survenus dans le passé (effondrement plus visible en surface au moment de l'étude, etc.).

D'autre part, le choix de réaliser des études simples et rapides s'appuyant sur *l'avis d'expert* implique automatiquement de privilégier des méthodes d'analyse de risque « *naturalistes* » plutôt que des modélisations lourdes et complexes. Ainsi, les méthodes qu'utilise l'expert sont principalement des *règles d'expérience* ou sont construites à partir d'hypothèses parfois fortes et reposent sur des modèles simples, le plus souvent géométriques. Le problème ici concerne alors le degré de fiabilité des méthodes mises en œuvre et la véracité des hypothèses utilisées.

Enfin, la demande réglementaire de quantification de la probabilité de survenance des risques miniers est aujourd'hui encore difficile à traiter. Il est généralement d'usage de qualifier celle-ci par les mentions « faible », « moyenne » ou « forte ».

4. Propositions pour l'intégration et la représentation des incertitudes

4.1. Hypothèse et démarche de travail

De manière à pallier les différents problèmes qui ont été évoqués précédemment, tout en restant fidèle à ce choix de simplicité et de rapidité de mise en œuvre de l'outil PPRM, une démarche de travail a été mise au point. Elle peut être présentée en trois étapes, consistant pour chacune à répondre à une question précise concernant un aspect particulier de l'évaluation, et amenant logiquement à la suivante :

1. Existe-t-il en un point précis du site étudié une source potentielle de danger ?
2. Supposant l'existence de cette source, est-il possible que celle-ci génère un dommage ou une nuisance en surface et quelle est la fiabilité du résultat énoncé ?
3. Quelles sont les mesures à prendre pour réduire, supprimer ou se prémunir contre ce dommage ou cette nuisance ?

4.2. Existence d'une source de danger

La première question qui concerne la présence de sources potentielles de danger, est relative à la confiance que peut avoir l'expert vis-à-vis des données qu'il a réunies. Dans le cadre de la mise en place d'un PPRM, les sources de danger, pour les aléas mouvement de terrain par exemple, sont évidemment les anciens ouvrages miniers, qu'ils concernent l'extraction de minerai de manière directe (zones d'exploitation partielle ou totale, galeries, etc.) ou indirecte (puits d'accès, travers-bancs ou galeries débouchant en surface, etc.).

Différentes sources d'informations sont alors nécessaires pour déterminer l'existence de ces ouvrages. Généralement, pour les mines les plus récentes, les Dossiers d'Arrêt Des Travaux (DADT) sont disponibles et, avec eux, les plans d'exploitation. Néanmoins, ceux-ci peuvent être de qualités diverses, incomplets voire erronés. Certains, antérieurs à la fin de l'exploitation, peuvent indiquer des avancées de travaux moindres que dans la réalité. D'autres peuvent, au contraire, mentionner des zones de travaux qui n'en sont restées qu'au stade de projet et ne comportent donc aucun vide. D'autres encore peuvent qualifier des zones de « dépilées », pour lesquelles l'exploitation a, a priori, été totale alors que de nombreux vides souterrains subsistent encore aujourd'hui. C'est notamment le cas dans certaines exploitations anciennes du bassin ferrifère de Lorraine (Préfecture de la Région Lorraine, 2005).

Pour les mines plus anciennes, la situation est parfois encore beaucoup plus délicate. Les anciennes exploitations ont souvent été artisanales et anarchiques et les plans miniers le sont tout autant. Les cartes sont le plus souvent inexploitable pour une analyse de risque (inexactitude, mauvais calage, distorsion, etc.) ou sont même parfois inexistantes ! L'expert doit alors s'appuyer sur des *indices* d'exploitation, comme la géologie, la présence de traces d'anciens désordres visibles depuis la surface, des témoignages locaux, etc. Là où du minerai existe, là où dans le passé se sont développés des mouvements de surface, s'est donc peut-être développée une exploitation minière et il est possible que des sources de danger existent encore aujourd'hui dans les environs.

La confiance que peut avoir un expert vis-à-vis de l'existence réelle d'une source de danger est donc dépendante de la source d'information qui lui a permis d'identifier celle-ci. La qualité de cette dernière influencera directement le niveau de confiance qu'il aura. Il apparaît alors intéressant de caractériser chaque type d'information par un niveau de confiance, un indice d'existence caractérisant *la probabilité qu'une source de danger existe réellement sur un site donné, compte-tenu de l'information qui a permis d'identifier celle-ci*. Plus cette « probabilité » est proche de 1 (et donc plus l'indice d'existence est grand), plus l'information est fiable et plus grande sera la crédibilité de la présence d'un ouvrage pouvant générer un accident. Cet indice peut par exemple être déterminé par un comité d'experts familiers des problèmes de réalisation des PPRM. Un exemple est donné dans le tableau I.

Tableau I. Exemple de grille de valeurs pour l'indice d'existence, variant de 0 à 5.

Plan à disposition	Exploitation partielle	Chambres et piliers		5	
		Galeries (ou autres vides de petites dimensions)		5	
	Exploitation totale	Bien foudroyé (cf. méthode d'exploitation)		1	
		Mal foudroyé (cf. qualité du plan, méthode d'exploitation)		3	
	Type inconnu	Exploitation voisine contemporaine	Exploitation totale		3
			Exploitation partielle		4
		Archives	Informations disponibles	Exploitation totale	
Exploitation partielle				5	
		Pas d'informations disponibles		3	
Pas de plan à disposition	Géologie favorable + ancien effondrement visible en surface			4	
	Géologie favorable + ancien effondrement mentionné dans les archives			3	
	Géologie favorable OU ancien effondrement en surface			2	
	Doute sur la nature de l'effondrement			1	

NB : Dans cette grille, l'indice d'existence (groupé par classe) concerne les vides souterrains de petites dimensions, pouvant engendrer des effondrements localisés en surface. Les valeurs données pour l'indice sont actuellement en cours de validation. (**0** : 0-10% ; **1** : 10-30% ; **2** : 30-50% ; **3** : 50-70% ; **4** : 70-90% ; **5** : 90-100%).

Il est important de préciser le sens réel de cet indice. Obtenir un indice d'existence de 5 ne signifie pas automatiquement qu'un aléa existe. Cela signifie uniquement que l'expert considère comme le plus crédible la possibilité de présence d'un ouvrage minier pouvant causer des dommages. Il lui faudra ensuite évaluer cet aléa, en utilisant des modèles intégrant des données sur la géométrie de l'exploitation, sur les caractéristiques mécaniques du recouvrement, etc. Une galerie située à 150m de profondeur parfaitement connue, accessible, parfaitement calée par rapport à la surface sera par exemple affectée d'un indice de 5. Par contre, compte-tenu de sa profondeur importante, l'aléa à l'aplomb de celle-ci sera évalué comme nul. A l'opposé, dans des zones d'anciens dépilages indiquées sur des cartes peu fiables, plus aucun vide ne subsiste a priori. Malgré tout, on pourra (et on devra, par précaution) retenir un aléa de type fontis notamment si les anciens travaux se situent à très faible profondeur (20-30m par exemple). Pour ces zones, l'indice d'existence sera plus faible que précédemment et un doute quant à l'existence même de ces vides souterrains existera.

4.3. Evaluation du niveau et du zonage de l'aléa

La question relative à l'existence d'une source de danger sur un site donné en amène automatiquement une seconde : que peut-il se passer si cette source de danger existe réellement ? Dans les deux exemples cités précédemment, la réponse semblait relativement simple puisque, par expérience, on sait par exemple que si une galerie de petites dimensions située à grande profondeur s'effondre, le vide sera rapidement comblé par les matériaux foisonnants du recouvrement et aucun désordre n'apparaîtra en surface. Malgré tout, même si on ne l'a pas exprimé de manière implicite, ce raisonnement repose sur une modélisation, ici le phénomène d'auto-comblement du vide souterrain et le simple bilan volumétrique entre volume des terrains foisonnants et vide initial.

Dans le cadre des PPRM, différents types d'aléas existent : mouvements de terrain, inondations, émissions de gaz de mines, pollutions des eaux et des sols, etc. Pour certains, les mécanismes physiques sont relativement faciles à appréhender et une modélisation sous une forme analytique, même très simple, est souvent possible. Pour les autres, on peut espérer que les recherches et les développements actuels permettront d'arriver également à la mise en place de tels modèles.

Si l'on prend l'exemple de l'aléa mouvement de terrain, pour lequel les travaux sont sûrement aujourd'hui les plus avancés, on s'aperçoit qu'il existe des modèles simples pour calculer sous une forme analytique les tassements (méthode oedométrique), les hauteurs de remontée de fontis (Didier et Salmon, 2004), les pentes de cuvettes d'affaissement (Deck, 2002), les sollicitations qui s'exercent sur un pilier (modèle de l'aire tributaire), etc. L'expert, en comparant les résultats obtenus à des valeurs-seuil, conclura sur l'existence d'un aléa (si par exemple, la valeur calculée du tassement dépasse un certain niveau admissible pour une

structure, ou si la hauteur de remontée du fontis est supérieure à l'épaisseur du recouvrement), déterminera une classe d'intensité puis délimitera un périmètre pour la zone concernée.

Les modèles intègrent généralement des données géométriques, concernant l'exploitation minière (profondeur, dimensions des vides, etc.) et des données mécaniques relatives aux matériaux exploités ou constituant le recouvrement. Dans le cadre des PPRM, ces données sont rarement connues de manière exacte et sont le plus souvent entachées d'incertitude : estimations via l'utilisation d'anciens plans, via des hypothèses d'experts, existence d'une variabilité naturelle des paramètres, etc. Il est malgré tout possible de définir, pour chacune de ces données des plages de variations en se basant sur le retour d'expérience, la rétro-analyse, l'expérience, le bon sens, la bibliographie, etc. Ces intervalles de confiance connus, des méthodes comme les simulations de Monte Carlo ou la Point Estimate Method (Hoek, 2000) peuvent être utilisées de manière à exprimer l'incertitude qui existe sur la variable de sortie du modèle (Cauvin et al., 2005). Ces méthodes permettent aux experts d'identifier les paramètres dont l'incertitude a le plus gros impact sur le résultat final. Elles permettent également d'estimer la probabilité qu'une variable donnée (hauteur de remontée de fontis, contrainte exercée sur un pilier, coefficient de sécurité d'une pente) dépasse un certain seuil (hauteur du recouvrement, résistance du pilier, valeur sécuritaire (1,2 ; 1,5 ; 2 ; 3) respectivement) (figure 2).

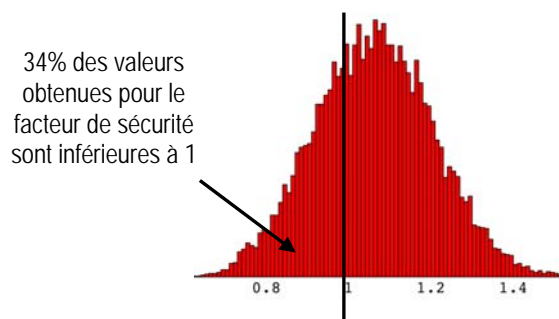


Figure 2. Distribution du facteur de sécurité d'un pilier de mine (in Cauvin et al., 2005).

4.4. Expression de la probabilité d'occurrence spatiale

A la suite de ces différents résultats, la notion de *probabilité d'occurrence spatiale* de l'aléa peut être introduite. Elle peut être définie comme la probabilité que deux événements surviennent simultanément : une source d'aléa existe *en un point donné* (événement E) ET une analyse montre, à la *qualité du modèle près*, que cette dernière peut porter atteinte à la sécurité des personnes, des biens et des écosystèmes situés à proximité (événement A). Cette probabilité, notée P(OSp) et formulée dans l'équation (1), est fortement dépendante du modèle utilisé dans l'analyse et correspond plus à l'aléa évalué qu'à l'aléa réel. Et puisque le paramètre 'temps' est généralement absent des modèles utilisés, P(OSp) peut être interprétée comme le pourcentage de chances qu'un site donné soit affecté *un jour* par l'aléa considéré.

$$P(OSp) = \text{Prob}(A \cap E) = \text{Prob}(E) \times \text{Prob}(A/E) \quad (1)$$

Didier (1999) combinait lui aussi, pour déterminer la probabilité d'occurrence d'un aléa, deux termes qualitatifs assez proches de ceux introduits dans l'équation (1). Malgré tout, le fait de croiser *de manière qualitative* ces termes peut rajouter de la confusion à l'étude en faisant par exemple coexister sous une même classe deux situations totalement différentes.

4.5. Etablissement du futur règlement

Comme mentionné en introduction, un projet de PPRM doit comporter un règlement détaillant les mesures d'interdiction et les prescriptions applicables aux biens existants ou futurs, ainsi que les mesures de prévention, de protection, de surveillance et de sauvegarde à mettre en œuvre dans les zones à risques. L'approche présentée précédemment peut alors avoir une grande utilité lors de la réalisation de ce règlement.

La cartographie de l'indice d'existence permet d'identifier des zones pour lesquelles des doutes existent quant à la présence de sources potentielles de nuisances. Dans ces zones, des travaux de recherche doivent être entrepris pour confirmer ou infirmer l'existence d'ouvrages miniers. Et il apparaît que c'est justement l'objet du règlement que de prescrire de tels travaux, dont l'utilité semble importante dans le cadre d'un développement urbain futur. La probabilité d'occurrence de l'aléa (équation (1)) pourra alors soit augmenter, soit diminuer.

D'un autre côté, l'utilisation de méthodes de type Monte Carlo pour l'évaluation du niveau et du zonage de l'aléa permettrait, comme on l'a dit précédemment, d'identifier les paramètres dont l'incertitude a le plus gros impact sur le résultat final. Utilisant ces outils, les experts peuvent dès lors prescrire des recommandations destinées à préciser les paramètres les plus critiques (caractérisations géotechniques, forages peu profonds, utilisation de caméras pour l'examen des vides, etc.), ce qui induira nécessairement une précision au niveau de l'affichage de l'aléa (modification du niveau ou du périmètre de zonage par exemple).

5. Exemple

De manière à illustrer ce travail et à en montrer les avantages, nous proposons l'exemple d'un site minier fictif dont nous avons pu récupérer le plan des travaux (figure 3, gauche).

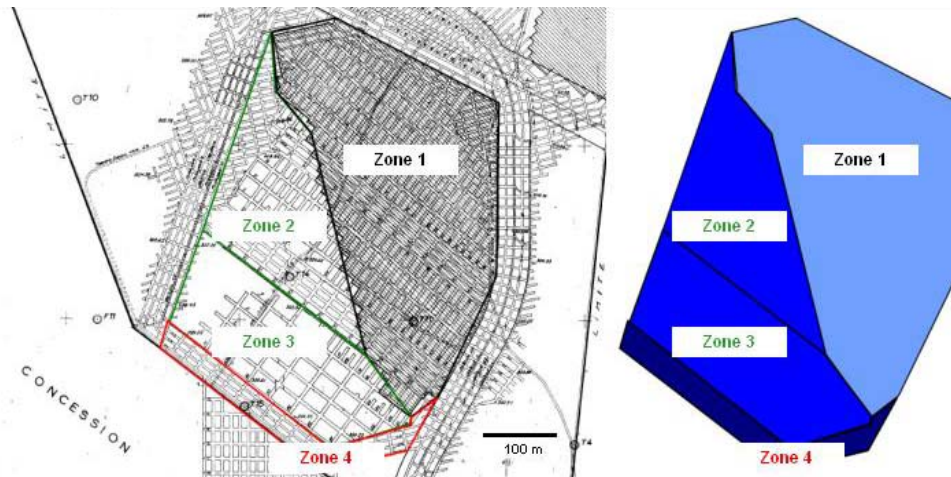


Figure 3. Présentation du site minier.

Quatre zones composent ce site. La zone 1 est indiquée sur le plan comme « dépilée » mais de grands doutes existent à propos de la qualité du foudroyage puisque celui-ci est ancien. Les zones 2 et 3 ont été exploitées par chambres et piliers, avec des piliers plus petits dans la zone 2 que dans la zone 3. Malgré tout, même si l'exploitation semble être partielle, les zones peuvent être en réalité foudroyées ou remblayées. Enfin, la zone 4, exploitée elle aussi par chambres et piliers, est accessible et a pu être visitée. A l'aplomb de ces quatre zones, on peut redouter des effondrements localisés de type fontis. Le tableau II présente les valeurs de l'indice d'existence, établies en utilisant le tableau I. La figure 3 (droite) les cartographie.

Tableau II. Qualité des informations minières.

	Descriptif	Nature de l'information	Principaux problèmes	Indice d'existence
Zone 1	Zone indiquée comme « dépilée »	Carte ancienne, peu fiable	Des vides peuvent subsister	3 (60 %)
Zone 2	Zone exploitée en chambres et piliers	Carte ancienne, peu fiable	Les galeries peuvent avoir été remblayées ; Les piliers peuvent être effondrés ou foudroyés	5 (95 %)
Zone 3	Zone exploitée en chambres et piliers			
Zone 4	Zone exploitée en chambres et piliers	Observation directe sur site		5 (100%)

Le modèle de remontée de fontis de l'INERIS (Didier et Salmon, 2004) peut ensuite être utilisé pour estimer si des effondrements localisés peuvent avoir lieu au carrefour des galeries. Dans cet exemple, on supposera que l'épaisseur du recouvrement est constante sur toute la zone et égale à 40m. Les seuls paramètres de calcul déterminants vis-à-vis de l'évaluation de l'aléa sont alors dans notre exemple, les dimensions de l'exploitation : hauteur (h) et largeur (l) des galeries. Lors de leur estimation, des erreurs sont commises, dues à l'utilisation d'hypothèses d'expert (zone 1) ou à des lectures sur carte (zones 2 et 3). Pour chaque zone, il est néanmoins possible de définir des plages de variations pour les valeurs d'intérêt et d'utiliser des techniques de type Monte Carlo pour estimer la hauteur de remontée de fontis. Le tableau III présente pour chaque zone la probabilité que la hauteur calculée pour la remontée d'un fontis soit supérieure à l'épaisseur du recouvrement (40m) (probabilité notée P(A)). On a supposé, après lecture du plan, que les galeries dans les zones 1 (avant dépilage), 2 et 4 étaient de dimensions égales et qu'elles étaient plus larges dans la zone 3.

Tableau III. Evaluation de l'aléa.

	Descriptif	Méthode d'estimation des dimensions des vides	Hauteur (m)		Largeur (m)		Hauteur estimée de remontée de fontis	P(A) %	Prob (OSp)
			h	+/-	l	+/-			
Zone 1	Zone indiquée comme dépilée	Expert	3,5	0,5	4	10*	33,5 m	48	29
Zone 2	Zone exploitée en chambres et piliers	Lecture du plan	3,5	0,5	4	1	33,5 m	14	13
Zone 3	Zone exploitée en chambres et piliers	Lecture du plan	3,5	0,5	5	1	37,5 m	37	35
Zone 4	Zone exploitée en chambres et piliers	Connues, mesures in situ	3,5		4		33,5 m	0	0

NB : Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel INERIS (Didier et Salmon, 2004), en utilisant un rayon de la cheminée de fontis de 5m, un coefficient de foisonnement des terrains de 1,3 et un angle de talus naturel de 40°.

* : On a estimé que dans la zone d'anciens dépilages, les vides pouvaient avoir une largeur variant entre la largeur d'une galerie et celle de l'ensemble {galerie+pilier(6m)+galerie} : la portée totale en cas de rupture d'un pilier.

Si on se base uniquement sur les hauteurs estimées de remontée de fontis, il semble que seule la zone 3 soit concernée par un aléa. En effet, même si la valeur calculée de 37,5m est inférieure à 40m, il se trouve que les 5 premiers mètres des recouvrements sont généralement très peu résistants et ne permettent pas qu'une voûte solide se crée au dessus de la cloche de fontis. Pour les autres zones, les fontis ne devraient pas déboucher au jour. Il apparaît malgré tout pour les zones 1 et 2 que si l'on tient compte des erreurs introduites lors de l'estimation des dimensions des galeries, un pourcentage non négligeable des simulations, allant jusque 48% pour la zone 1, donnent des hauteurs de remontée de fontis supérieures à 40m.

Utilisant tous les résultats des tableaux II et III, il devient possible de caractériser l'aléa fontis pour chacune des zones. Son intensité est la même, dans notre exemple, quelque soit la zone étudiée puisqu'on s'attend à l'apparition de cratères d'au maximum une dizaine de mètres de diamètre pouvant porter atteinte localement à la sécurité des personnes et des biens. Les probabilités d'occurrence spatiales de l'aléa peuvent être estimées pour chacune des zones en combinant l'indice d'existence et la probabilité P(A) dans l'équation (1) (tableau III). La figure 4 propose une représentation *possible* de l'aléa sur le secteur concerné. On notera que les problématiques liées au zonage de l'aléa n'ont pas été abordées ici. On notera également qu'une telle carte, avec la grille qui l'accompagne, permet de répondre en grande partie aux problèmes présentés au chapitre 3 et qu'elle s'avère très utile pour la phase suivante du PPRM qu'est l'établissement de la carte réglementaire.

En zone 3 par exemple, des vides existent de manière quasi-certaine et la hauteur estimée de remontée de fontis est très proche de l'épaisseur du recouvrement. Le problème concerne alors dans cette zone la variabilité des données et la fiabilité des modèles utilisés. Il conviendrait de préciser les études au niveau des enjeux de surface (calage précis des plans vis-à-vis du jour, précisions des paramètres du modèle, etc.), ce qui impliquerait une campagne de travaux relativement lourde (études géotechniques, sondages carottés, utilisation de caméra, etc.). Le règlement pourrait ensuite introduire des mesures de surveillance et de

protection, voire une interdiction totale d'effectuer des travaux. En zone 1 par contre, c'est principalement l'existence de vides qui pose problème et des campagnes de recherches doivent être effectuées autour des enjeux existants ou futurs. Si celles-ci s'avèrent infructueuses, l'aléa pourra être déclassé, si ce n'est tout simplement écarté.

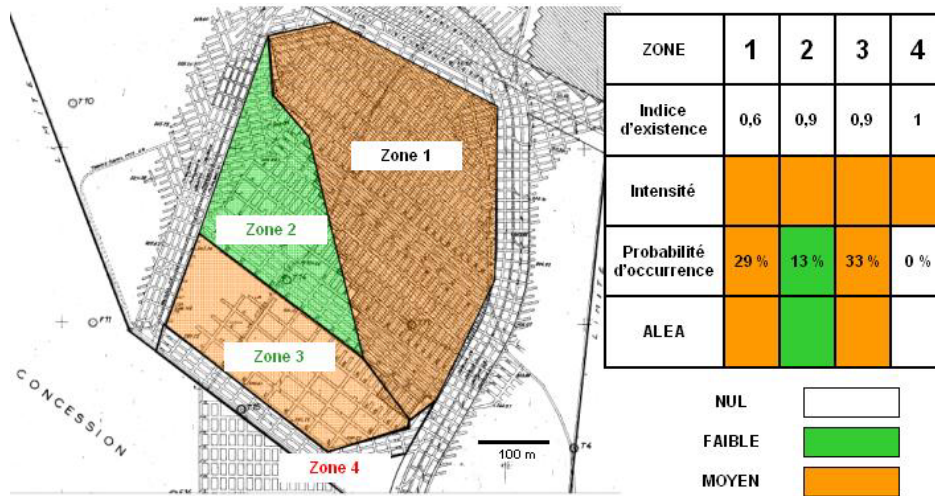


Figure 4. Proposition de carte d'aléa pour le secteur étudié.

Au travers de cet exemple, on peut s'apercevoir de l'importance que peuvent avoir les deux termes de l'équation (1) introduits dans cette étude. Pris séparément, ils permettent de pointer du doigt les problèmes majeurs rencontrés lors l'élaboration d'un PPRM et d'apporter un meilleur formalisme quant à la prise en compte des incertitudes dans les PPRM. Combinés, ils peuvent permettre une meilleure caractérisation de l'aléa dans une forme quantitative. Malgré tout, la notion de probabilité d'occurrence *réelle* de celui-ci n'a pas encore pu être véritablement évaluée (elle n'a pu être estimée qu'à la qualité du modèle près) et des travaux doivent être entrepris dans ce sens.

6. Références bibliographiques

- Cauvin M., Verdel T., Salmon R. (2005) Modelling uncertainties in pillar stability analysis. *Proc. Post-Mining 2005, November 16-17, Nancy, France.*
- Deck O. (2002) Etude des conséquences des affaissements miniers sur le bâti. Propositions pour une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité du bâti. *Thèse de Doctorat. INPL Nancy, France, 242 pages.*
- Didier C. (1999) Etablissement d'un Plan de Prévention des Risques liés à la présence d'anciennes carrières souterraines. Principes d'une analyse par configurations types. *Conférence de la Décennie International de la Prévention des Catastrophes Naturelles, Paris, 17-19 juin 1999, session 2, pp. 85-92.*
- Didier C., Leloup J. (2005) The MRPP: A powerful operational regulatory tool to prevent and manage post-mining risks. *Proc. Post-Mining 2005, November 16-17, Nancy, France.*
- Didier C., Salmon R. (2004) Evaluation du risque d'apparition d'un fontis en surface : un modèle volumétrique probabiliste. *Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur (JNGG), Lille, 28-30 juin 2004, pp.451-462.*
- Hoek E. (2000) *Practical Rock Engineering* (2000 edition). *En ligne < <http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>*
- INERIS (2004) L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers, Guide méthodologique. Ouvrage collectif sous la direction de l'INERIS. *INERIS-DRS-04-51198/R01. 30/06/2004. 128 pages.*
- Préfecture de la Région Lorraine (2005) L'Après Mine dans le Bassin Ferrifère Lorrain – octobre 2005. *En ligne < <http://www.lorraine.drir.gouv.fr/mines/pdf/BilanBassinFer.pdf>*