



HAL
open science

**Méthodologie de hiérarchisation du risque
d'effondrement minier sous bâti et infrastructure.
Application au bassin ferrifère lorrain**

Myriam Merad, Thierry Verdel, Samy Kouniali, Bernard Roy

► **To cite this version:**

Myriam Merad, Thierry Verdel, Samy Kouniali, Bernard Roy. Méthodologie de hiérarchisation du risque d'effondrement minier sous bâti et infrastructure. Application au bassin ferrifère lorrain. Colloque International Après-mine 2003, Feb 2003, Nancy, France. pp.NC. ineris-00972410

HAL Id: ineris-00972410

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972410>

Submitted on 3 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.

METHODOLOGIE DE HIERARCHISATION DU RISQUE D'EFFONDREMENT MINIER SOUS BATI ET INFRASTRUCTURES. APPLICATION AU BASSIN FERRIFERE LORRAIN

MERAD Myriam Mokhtaria¹, VERDEL Thierry², KOUNIALI Samy³, ROY Bernard¹

¹LAMSADE, Université de Paris IX-Dauphine, 75775 Paris Cedex {merad@mines.inpl-nancy.fr }

²LAEGO, Ecole des Mines de Nancy, 54000 Nancy {verdel@mines.inpl-nancy.fr}

³INERIS, Parc Technologique ALATA BP2, Verneuil en Halatte

RESUME : Une méthodologie de gestion à long terme du risque d'effondrement minier sous le bâti et les infrastructures est proposée pour répondre aux besoins liés à l'arrêt de l'exploitation minière dans la région lorraine. Elle repose sur la gestion et l'exploitation de données fournies par un système d'information géographique, mis en place à cet effet, et conduit à l'élaboration d'une cartographie du risque d'effondrement minier, s'appuyant sur la méthodologie d'aide multicritère à la décision ELECTRE TRI. Chaque classe de risque prédéfinie renvoie à la mise en place de dispositifs de surveillance appropriés auxquelles sont affectées les zones étudiées.

MOTS-CLES : Risque, affaissement, incertitudes, multicritères, ELECTRE TRI.

ABSTRACT : The end of mining operations in the Lorraine region raises the problem of post mining management. A methodology for the long-term management of mining subsidence under buildings and infrastructure is therefore proposed. This methodology is based on the management and use of data provided by the geographical information system set up for this purpose and for the risk-mapping. It is based on a multi-criteria decision methodology ELECTRE TRI, with a view to setting up adequate monitoring system.

KEY-WORDS : Risk, collapse, uncertainty, multiple criteria, ELECTRE TRI.

1. Introduction

Située au Nord Est de la France, la Lorraine a été l'une des plus importantes régions minières françaises. Le bassin ferrifère Lorrain a été exploité, pendant plus d'un siècle jusqu'en 1980, avec la méthode des chambres et piliers principalement (Homand et al., 2001).

Les affaissements miniers survenus récemment dans le bassin ferrifère lorrain, ont conduit à une prise de conscience collective de la gravité des problèmes liés à l'abandon des exploitations minières (Cour des comptes, 2000).

En France, des progrès importants ont été entrepris dans la maîtrise des risques engendrés par les mouvements de terrain grâce à une politique d'élaboration des " Plans de Prévention des Risques " (PPR) aboutissant à l'affichage de cartes d'aléa.

Cependant, alors qu'ils sont de plus en plus disponibles dans des zones de carrières, les PPR sont encore à l'état de projet pour les zones minières.

De larges étendues sous-minées, à l'aplomb de zones bâties ou d'infrastructures, doivent pourtant faire l'objet d'un affichage du risque. Dans les premières phases de

planification et d'aide à la décision, cet affichage du risque en quatre classes permettra la mise en place de dispositifs de surveillance adéquats. Cet article propose ainsi une méthodologie de gestion du risque d'effondrement minier sous zones bâties et/ou d'infrastructures.

Nous présenterons successivement : la distinction entre les cartes de risque et les cartes d'aléa ; l'identification et la sélection des zones à risque ; le choix d'une famille de critères de hiérarchisation du risque d'effondrement minier ; la méthodologie de hiérarchisation du risque et la méthode ELECTRE TRI appliquée au contexte du risque. Nous concluons par un exemple d'application.

2. Carte d'aléa et Carte de risque

Le terme *aléa* peut être défini comme la probabilité qu'il se produise un phénomène ou événement, favorable ou non (danger), en un site donné, au cours d'une période de référence donnée et atteigne une intensité ou une gravité qualifiable ou quantifiable (guide PPR). Plus simplement, il désigne un événement potentiellement dommageable pouvant être caractérisé par une probabilité d'occurrence (ou une estimation souvent qualitative de cette probabilité) et une intensité (l'ampleur de l'événement).

Le *risque* est, quant à lui, défini comme le croisement l'aléa et des dommages prévisibles (vulnérabilité) occasionnés au cours d'une période donnée sur un site donné.

Jusqu'à présent, les cartographies de risque sont rares à cause de la difficulté d'évaluation quantitative de l'aléa et des dommages prévisibles, mais aussi du fait de la nécessité de faire appel, pour ces évaluations, à des connaissances très variées issues de disciplines différentes.

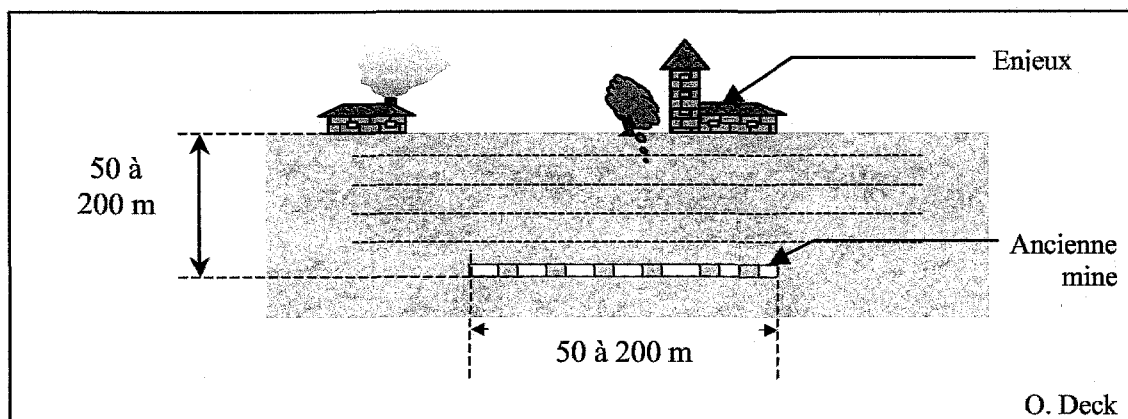


Figure 1 Risque induit par la présence de mine et d'enjeux en surface

3. Données d'entrée

Le bassin ferrifère Lorrain a fait l'objet d'un vaste travail d'archivage aboutissant à la mise au point d'un Système d'Information Géographique (SIG) (Homand et al., 2001).

Le choix des zones à classer en fonction du risque a fait l'objet d'une procédure de sélection préalable présentée en figure 2 à partir des informations contenues dans le SIG.

Les données disponibles pour chaque zone sont soit quantitatives (taux de défrèvement, profondeur, sollicitation, ouverture, ...) soit qualitatives (présence de faille, couche exploitée, nature de l'intercalaire, ...).

Du fait de l'étendue importante du bassin étudié et des objectifs de la cartographie du risque, les données pertinentes sont synthétisées à travers une famille de critères pouvant être renseignées sur chaque zone à risque d'effondrement retenue pour l'étude de hiérarchisation. Le risque d'effondrement minier peut donc être représenté sous une forme *multicritère*.

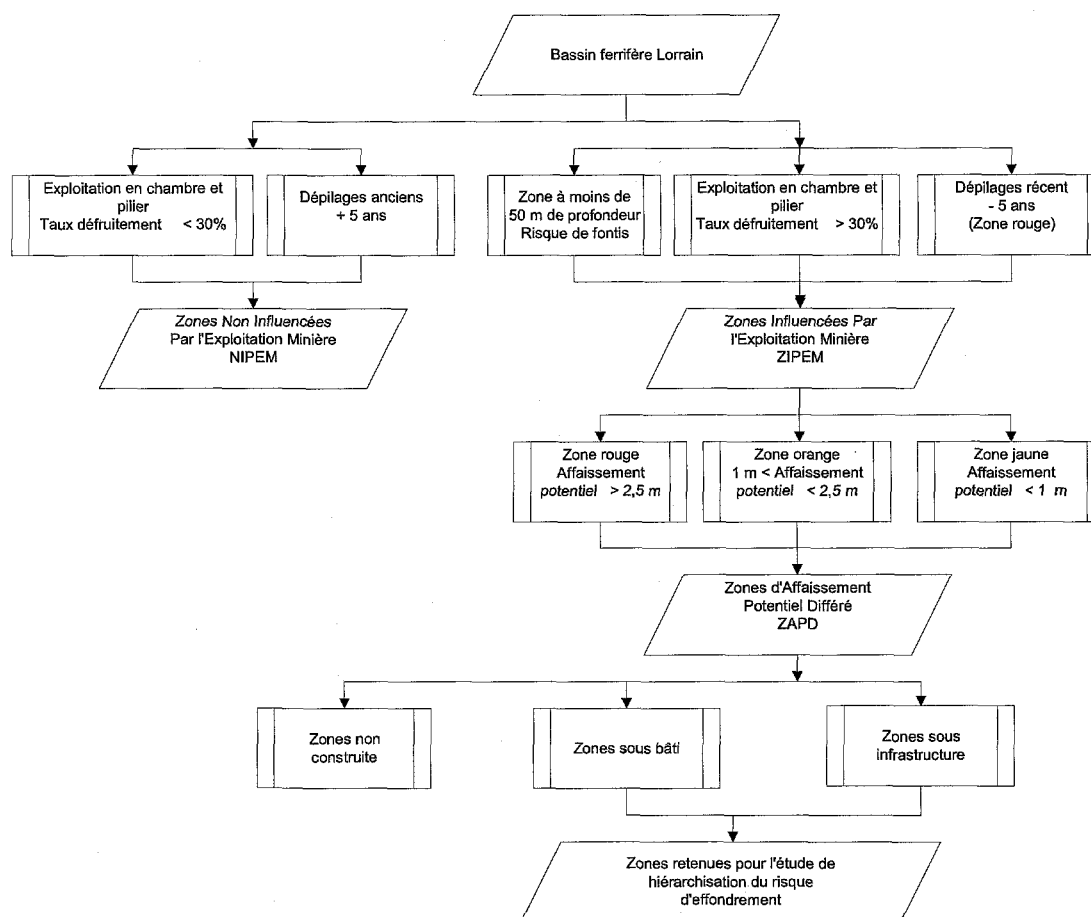


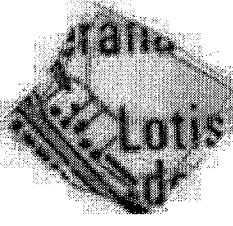
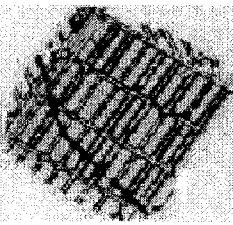
Figure 2 Procédure de sélection des zones à risque d'effondrement à hiérarchiser

Ces critères issus d'une réflexion menée sous le contrôle d'un comité d'experts ont été regroupés sous deux rubriques principales caractérisant d'une part la prédisposition à la rupture de l'ouvrage minier et d'autre part la sensibilité de la surface. La prédisposition à la rupture fournit une estimation de la probabilité de rupture tandis que la sensibilité de la surface regroupe d'une part une estimation de l'intensité potentielle du mouvement induit par la rupture en surface et d'autre part de l'importance des enjeux ou des dommages prévisibles (ici dénommés vulnérabilité).

Tableau 1 Famille de critères choisie

| N° | Critère | Nature | Unité | Sens de l'accroissement du risque | hiérarchisation des zones à risques sous bâti | hiérarchisation des zones à risques sous infrastructures |
|--------------------|--|-------------|----------|-----------------------------------|---|--|
| G1 | Prédisposition à la rupture de l'ouvrage minier | | | | | |
| g _{1.1} | <i>sollicitation corrigée</i> | Quantitatif | bar | ↗ | 5 | 5 |
| g _{1.2} | <i>présence de faille</i> | Qualitatif | (codage) | ↗ | 1 | 1 |
| g _{1.3} | <i>superposition des piliers</i> | Qualitatif | (codage) | ↗ | 1 | 1 |
| g _{1.4} | <i>taille et régularité des piliers</i> | Qualitatif | (codage) | ↗ | 1 | 1 |
| g _{1.5} | <i>sensibilité à l'envoyage</i> | Qualitatif | (codage) | ↗ | 5 | 5 |
| G2 | Sensibilité de la surface | | | | | |
| g _{2.1} | <i>profondeur</i> | Quantitatif | m | ↘ | 1 | 1 |
| g _{2.2} | <i>affaissement maximum attendu</i> | Quantitatif | m | ↗ | 1 | 1 |
| g _{2.3} | <i>déformation</i> | Quantitatif | mm/m | ↗ | 20 | 20 |
| g _{2.4} | <i>étendue de la zone</i> | Quantitatif | hectare | ↗ | 1 | 4 |
| g _{2.5.1} | <i>vulnérabilité du bâti</i> | Qualitatif | (codage) | ↗ | 10 | sans objet |
| g _{2.5.2} | <i>vulnérabilité des routes</i> | Qualitatif | (codage) | ↗ | sans objet | 4 |
| g _{2.5.3} | <i>vulnérabilité des voies ferrées</i> | Qualitatif | (codage) | ↗ | sans objet | 4 |
| g _{2.5.4} | <i>vulnérabilité des ouvrages d'art</i> | Qualitatif | (codage) | ↗ | sans objet | 4 |
| g _{2.5.5} | <i>vulnérabilité des réseaux divers</i> | Qualitatif | (codage) | ↗ | sans objet | 2 |

Tableau 2 Exemple de renseignements d'une zone Z sur l'ensemble des critères de hiérarchisation

| | Plan de la surface | Formules de calcul | Renseignement des critères |
|---|--|--|---|
|  | <p>Etendue de la zone = 2.9 hectares</p> <p>Présence de lotissement, de maisons isolées et d'une route nationale</p> | | <p>g_{2.4} (Z) : 2.9 hectares</p> <p>g_{2.5.1} (Z) : 10</p> |
| | Plan du fond | Formules de calcul | Renseignement des critères |
|  | <p>Zone défruitée à 35 %</p> <p>Profondeur min = 172 m</p> <p>Profondeur max = 177 m</p> <p>Accidents géologiques : non constatés</p> <p>Piliers gros et réguliers</p> <p>Exploitation monocouche en couche grise</p> <p>Présence d'un dépilage en bordure</p> <p>Ouverture de 4 m</p> | <p>Sollicitation corrigée: $1.2 \cdot 0.25 \cdot \text{Profondeur max} / (1 - \text{Taux de fruitement})$.</p> <p>Affaissement maximum attendu: Déduit à partir des courbes d'affaissement.</p> <p>Déformation maximum : Paramètre $\alpha \cdot \text{Affaissement} / \text{Profondeur}$. Paramètre α varie entre 0.75 et 1.5</p> | <p>g_{1.1} (Z) : 8.17 MPa</p> <p>g_{1.2} (Z) : 0</p> <p>g_{1.3} (Z) : 0</p> <p>g_{1.4} (Z) : 0</p> <p>g_{1.5} (Z) : 10</p> <p>g_{2.1} (Z) : 172 m</p> <p>g_{2.2} (Z) : 0.8 m</p> <p>g_{2.3} (Z) : 4.93 mm/m</p> |

4. Méthodologie de hiérarchisation du risque d'effondrement minier sous zones bâties et infrastructures

Les zones sélectionnées sur le bassin ferrifère lorrain pour l'étude de hiérarchisation du risque d'effondrement minier doivent faire l'objet, selon le niveau de risque estimé, de la mise en place d'un dispositif de surveillance adéquat.

Ainsi, quatre classes à risque d'effondrement ont été préalablement définies. Par convention, la classe 1 est la classe correspondant au risque le plus important et la classe 4 celle qui correspond au risque le moins important. Ces classes sont exclusives et ordonnées.

Dans la suite de l'article nous adopterons les conventions suivantes :

- : Ensemble des zones présentant un risque d'effondrement minier sous bâties et infrastructures.
- Z_i : Zone à risque d'effondrement.
- Pr_h : Profil d'entrée bas de la classe h avec $h \in \{1,2,3,4\}$.
- n : Nombre de zones.
- m : Nombre de critères.
- g_j : Critère d'évaluation du risque.
- k_j : Poids du critère g_j .

Un profil de classe, Pr_h , est une zone fictive qui représente une norme d'entrée à une classe à risque. Chaque profil d'entrée Pr_h est évalué sur chaque critère g_j et prend ainsi une position sur une échelle quantitative ou qualitative. La classe 1 étant la plus risquée, le profil Pr_1 présente, sur chaque critère, un risque au moins aussi élevé que Pr_2 ; Pr_2 présente de même, sur chaque critère, un risque au moins aussi élevé que Pr_3 .

Chaque zone Z_i est ensuite évaluée sur chaque critère g_j ce qui permet d'établir une comparaison, sur chaque critère, entre le degré de risque estimé pour la zone Z_i et le degré de risque de chaque profil Pr_h . Ainsi chaque zone Z_i est évaluée, du point de vue du risque, sur des critères différents ; et il est partiellement possible de savoir si cette dernière entre dans une classe à risque h .

La procédure d'affectation aux classes de risque pour laquelle nous avons opté est basée sur la méthode ELECTRE TRI (Roy et Bouyssou, 1992). Celle-ci permet :

- d'utiliser des critères qualitatifs et quantitatifs ;
- d'éviter des effets de compensation : pour une zone Z_j , un risque élevé estimé sur le critère g_{j1} ne compense pas un risque faible sur un critère g_{j2} comme c'est le cas avec une moyenne pondérée par exemple ;
- de prendre en compte l'incertitude et la *mauvaise-connaissance* qui résultent de la nature de l'information et du type de support utilisé pour l'archivage (Dikau et al. 1996) ;
- de considérer l'importance du rôle joué par chaque critère dans l'estimation du risque (poids).

5. Méthode ELECTRE TRI appliquée au contexte du risque

La méthode ELECTRE TRI permet d'affecter des zones Z_i à des classes de risque prédéfinies et ordonnées. Ces classes sont délimitées (fermées) en bas par un profil limite Pr_h (figure 3).

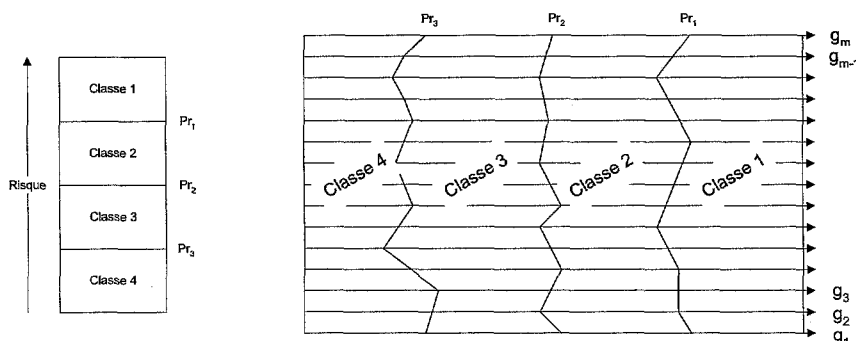


Figure 3 Quatre classes de risque d'effondrement séparées par trois profils bas Pr_h

Figure 4 Position de principe des profils de classe Pr_h sur chaque critère g_j

Pour connaître la classe d'affectation de la zone Z_i , on la compare, sur chaque critère g_i , aux profils Pr_h .

L'incertitude est prise en compte à travers deux seuils :

Le seuil d'indifférence q_j . Il représente le plus grand écart, sur l'échelle du critère g_j , entre la position de Z_i et la position de Pr_h pour lequel Z_i est estimée comme présentant un niveau de risque identique à Pr_h .

Le seuil de préférence p_j . Il représente le plus petit écart, sur l'échelle du critère g_j , entre la position de Z_i et la position de Pr_h pour lequel Z_i est estimée comme présentant un niveau de risque strictement plus important que Pr_h .

Dans notre cas, étant donné que les classes à risque sont fermées par le bas, si Z_i présente une évaluation du risque, sur chaque critère, comprise entre l'évaluation du risque faite pour Pr_h et Pr_{h+1} , alors Z_i est affectée en classe h .

Par convention, si une zone Z_i a un niveau de risque supérieur ou égal au profil Pr_h , alors cette zone est affectée en classe h .

ELECTRE TRI propose deux procédures d'affectation : une procédure *pseudo-conjonctive* et une procédure *pseudo-disjonctive* (Roy, 2002). Pour y parvenir, un *indice de crédibilité* est introduit.

5.1. Indice de crédibilité

Cet indice, déterminé à partir des m critères, permet d'estimer la crédibilité de l'assertion « Z_i présente un niveau de risque au moins aussi élevé que Pr_h » (ou « Pr_h présente un niveau de risque au moins aussi élevé que Z_i »). Il est alors noté $\sigma(Z_i, Pr_h)$ (ou $\sigma(Pr_h, Z_i)$) et prend des valeurs comprises entre 0 et 1.

Quand cet indice prend la valeur 0, cela signifie que l'assertion est totalement rejetée, soit parce qu'aucun critère n'y adhère, soit parce qu'un critère y oppose un veto ; si l'indice prend la valeur 1, l'assertion est complètement crédible ce qui signifie qu'aucun critère ne s'oppose à l'assertion (Roy, 2002).

L'indice de crédibilité prend appui sur deux autres indices qui le composent : un *indice de concordance* et un *indice de discordance*.

L'*indice de concordance* se calcule de la manière suivante :

$$c(Z_i, Pr_h) = \frac{\sum_{j \in F} k_j c_j(Z_i, Pr_h)}{\sum_{j \in F} k_j} \quad (1)$$

où F est la famille des critères et c_j est l'indice de concordance partiel sur le critère j (dont la valeur se déduit des schémas de la figure 5).

Il prend en compte les critères pour lesquels l'assertion « Z_i présente un niveau de risque au moins aussi élevé que Pr_h » n'est pas rejetée ; tout en considérant leurs poids relatifs.

L'*indice de discordance* $d_j(Z_i, Pr_h)$ est calculé pour les critères qui s'opposent à l'assertion « Z_i présente un niveau de risque au moins aussi élevé que Pr_h ». La notion de veto v_j est introduite à travers un seuil v_j qui rend compte, lorsque le risque est trop élevé sur un critère j , du refus de valider l'assertion « Z_i présente un niveau de risque au moins aussi élevé que Pr_h ».

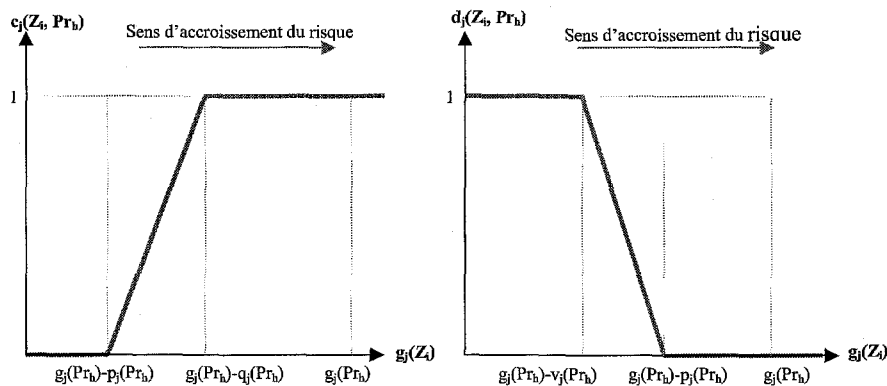


Figure 5. Principe du calcul de l'indice de concordance partiel c_j et de l'indice de discordance d_j

Enfin, au moyen des deux indices précédant, on calcule un degré de crédibilité qui prend la forme suivante :

$$\sigma(Z_i, Pr_h) = c(Z_i, Pr_h) \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1 - d_j(Z_i, Pr_h)}{1 - c_j(Z_i, Pr_h)} \quad \text{avec } \bar{F} = \{ j \in F / d_j(Z_i, Pr_h) > c_j(Z_i, Pr_h) \} \quad (2)$$

Pour valider l'assertion, l'indice de crédibilité est comparé à un paramètre λ . Intuitivement, λ représente la majorité que l'on souhaite obtenir (Yu, 1992).

Il est tout à fait envisageable de rencontrer les situations suivantes :

- $\sigma(Z_i, Pr_h) \geq \lambda$ et $\sigma(Pr_h, Z_i) \geq \lambda$ alors Z_i et Pr_h présentent le même niveau de risque ; ceci est noté Z_i I Pr_h .
- $\sigma(Z_i, Pr_h) \geq \lambda$ et $\sigma(Pr_h, Z_i) < \lambda$ alors Z_i présente un niveau de risque strictement plus élevé que Pr_h ; ceci est noté Z_i P Pr_h .
- $\sigma(Z_i, Pr_h) < \lambda$ et $\sigma(Pr_h, Z_i) < \lambda$ alors Z_i et Pr_h présentent des niveaux de risque incomparables ; ceci est noté Z_i R Pr_h .

5.2. Procédure d'affectation aux classes à risque

Le choix de la procédure d'affectation de l'ensemble des n zones aux quatre classes de risque d'effondrement s'est porté sur la procédure *pseudo-disjonctive*. Celle-ci préserve au mieux le *principe de précaution*.

Procédure d'affectation pseudo-disjonctive

Cette procédure, inspiré de la logique de précaution maximum, consiste à comparer, successivement, Z_i aux Pr_h en commençant par le profil le plus bas. Cette comparaison prendra la forme suivante : $\sigma(Z_i, Pr_h) \geq \lambda$ ou $\sigma(Pr_h, Z_i) < \lambda$. L'affectation de Z_i à une classe à risque prend effet dès le moment où le prochain profil balayé viole la condition.

Ainsi, la procédure pseudo-disjonctive peut se décomposer en les étapes suivantes (Roy et Bouyssou, 1992) :

- comparer successivement Z_i à Pr_h , $h=3,2,1$;
- affecter Z_i à la classe $(h+1)$ quand Pr_h devient le premier profil limite tel que « Pr_h présente un niveau de risque faiblement ou strictement plus élevé que Z_i ».

Il est nécessaire de rappeler que la classe d'affectation d'une zone Z_i en procédures *pseudo-conjonctive* ou *pseudo-disjonctive* ne diffère qu'en cas de relation d'incomparabilité avec un profil Pr_h . Ainsi, si dans le cas de la *procédure pseudo-conjonctive*, Z_i est affectée à la classe bornée en haut par Pr_h , dans le cas de la *procédure pseudo-disjonctive* Z_i est affectée à la classe bornée en bas par Pr_h (Roy, 2002).

De plus, le caractère conjonctif ou disjonctif des procédures ELECTRE TRI peut être marqué par :

- un renforcement de la majorité requise, en rapprochant λ de 1 ;
- un renforcement du mécanisme de veto, en rapprochant la valeur de chaque seuil de veto du seuil de préférence.

6. Application et résultats

Un ensemble de n zones Z_i doit faire l'objet de la mise en place de dispositifs de surveillance adéquats. Pour y parvenir, une évaluation, sur différents critères, du risque inhérent doit être effectuée. L'exemple qui suit présente une étude d'affectation à quatre classes de risque d'un échantillon de dix zones.

6.1. Famille de critères d'évaluation du risque

Deux jeux de critères différents ont été utilisés pour distinguer les zones sous bâtis des zones sous infrastructures.

Ainsi, les critères regroupés sous la rubrique *Prédisposition à la rupture de l'ouvrage minier* (cf. tableau des critères) sont communs aux deux jeux de critères. La distinction vient des critères *Sensibilité de la surface* où pour les zones sous bâtis les critères concernés sont $g_{2.1}$ à $g_{2.4}$ et $g_{2.5.1}$ et pour l'infrastructure $g_{2.1}$ à $g_{2.4}$ et $g_{2.5.2}$ à $g_{2.5.5}$.

Les critères $g_{1.1}$, $g_{2.1}$, $g_{2.2}$, $g_{2.3}$, et $g_{2.4}$ sont des critères quantitatifs qui prennent leurs valeurs sur des échelles dont l'unité est différente. Par exemple, $g_{1.1}$ qui désigne la sollicitation sur pilier est estimé en (bar) et $g_{2.2}$ qui représente la profondeur en (m).

Les critères restant sont d'ordre qualitatif. Ainsi, le critère *superposition des piliers* peut présenter les états suivants :

- une couche exploitée ;
- deux couches avec piliers bien superposés ou intercalaire épais (≥ 6 m) ;
- deux couches avec piliers mal superposés et intercalaire mince (< 6 m).

A chaque état correspond une codification numérique : pour le critère *superposition des piliers* le premier état est codé 0, le deuxième 10 et le troisième 40 selon le choix opéré par le groupe d'experts.

L'échantillon des zones étudiées est présenté dans le tableau 3.

L'attribution d'une pondération aux différents critères a nécessité l'intervention d'experts et d'utilisateurs du SIG (Merad, 2000).

Deux méthodes ont été utilisées pour faire ressortir des jeux de poids. La première a consisté à réunir le comité d'experts et à le faire débattre sur les critères jusqu'à l'obtention d'un consensus sur les poids respectifs. La deuxième méthode qui a été utilisée est celle dite « *des cartes* » (Roy et Figuera, 1998). Les avantages, non exhaustifs, de cette méthode révisée de *Simos* sont : d'éviter que des critères soient éliminés en leur attribuant un poids nul ; de prendre en compte différentes pondérations, données par des intervenants en fonction de leurs intérêts et leurs domaines de compétences respectifs.

Tableau 3 Evaluations des zones sur chaque critère

| Zones | Critères | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| | g1.1 | g1.2 | g1.3 | g1.4 | g1.5 | g2.1 | g2.2 | g2.4 | g2.3 | g2.5.1 |
| Z ₁ | 58 | 10 | 0 | 20 | 0 | 35 | 2.37 | 3.6 | 6.8 | 20 |
| Z ₂ | 48 | 0 | 40 | 0 | 0 | 70 | 1.28 | 0.2 | 1.83 | 10 |
| Z ₃ | 97 | 10 | 10 | 0 | 30 | 200 | 1.67 | 7.4 | 0.84 | 30 |
| Z ₄ | 104 | 10 | 10 | 10 | 30 | 203 | 1.68 | 9. | 0.83 | 20 |
| Z ₅ | 97 | 0 | 10 | 0 | 10 | 222 | 1.2 | 1.8 | 0.54 | 20 |
| Z ₆ | 98 | 10 | 0 | 20 | 0 | 50 | 1.27 | 6.7 | 2.54 | 20 |
| Z ₇ | 123 | 0 | 0 | 0 | 30 | 155 | 0.96 | 14.1 | 0.61 | 10 |
| Z ₈ | 112 | 10 | 0 | 0 | 30 | 180 | 0.71 | 6.4 | 0.39 | 20 |
| Z ₉ | 113 | 0 | 40 | 20 | 0 | 115 | 2.18 | 2.5 | 1.89 | 10 |
| Z ₁₀ | 110 | 10 | 0 | 10 | 30 | 170 | 0.31 | 2.6 | 0.18 | 20 |

6.2. Détermination des profils limites des classes à risque

Pour mettre en place des conditions d'entrée aux classes à risque d'effondrement, nous disposons d'exemples d'affectation de zones Z_i issus d'une étude antérieure. Une analyse de données des zones affectées aux quatre classes de risque a permis de faire ressortir des conditions d'entrée (profils limites). Ces conditions ont fait l'objet d'une validation par un comité d'experts.

6.3. Affectation des zones aux classes de risque

La méthode ELECTRE TRI a été mise en oeuvre au moyen du logiciel ELECTRE TRI version 2.0.

Pour chacune des dix zones du tableau 3, nous avons donc calculé les deux indices de crédibilité $\sigma(Z_i, Pr_h)$ et $\sigma(Pr_h, Z_i)$ et obtenu les résultats du tableau 4.

Tableau 4 Indices de crédibilité $\sigma(Z_i, Pr_h)$ et $\sigma(Pr_h, Z_i)$

| | Pr ₃ | Pr ₂ | Pr ₁ | Affectation des zones aux classes à risque $\lambda = 0,65$ | Analyse de sensibilité |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|---|------------------------|
| $\sigma(Z_i, Pr_h)$ $\sigma(Pr_h, Z_i)$ | | | | | |
| Z ₁ | 0,717 | 0,717 | 0,500 | Classe 1 | Classe 1 et 2 |
| | 0,500 | 0,522 | 0,544 | | |
| Z ₂ | 0,500 | 0,478 | 0,478 | Classe 1 | Classe 1 et 2 |
| | 0,522 | 0,522 | 0,544 | | |
| Z ₃ | 0,956 | 0,913 | 0,348 | Classe 2 | Stable |
| | 0,087 | 0,674 | 0,891 | | |
| Z ₄ | 0,972 | 0,935 | 0,130 | Classe 1 | Stable |
| | 0,283 | 0,891 | 0,891 | | |
| Z ₅ | 0,565 | 0,456 | 0,000 | Classe 4 | Classe 3 et 4 |
| | 0,891 | 1,000 | 1,000 | | |
| Z ₆ | 0,848 | 0,826 | 0,500 | Classe 1 | Classe 1 et 2 |
| | 0,383 | 0,522 | 0,544 | | |
| Z ₇ | 0,717 | 0,239 | 0,109 | Classe 3 | Classe 3 et 4 |
| | 0,739 | 0,783 | 0,891 | | |
| Z ₈ | 0,500 | 0,456 | 0,130 | Classe 4 | Classe 3 et 4 |
| | 0,761 | 0,783 | 0,891 | | |
| Z ₉ | 0,630 | 0,609 | 0,489 | Classe 1 | Classe 1 et 2 |
| | 0,391 | 0,391 | 0,565 | | |
| Z ₁₀ | 0,500 | 0,478 | 0,130 | Classe 4 | Stable |
| | 0,717 | 0,783 | 0,891 | | |

Le paramètre λ , qui permet d'ajuster les affectations des zones aux classes de risque d'effondrement, est fixé de manière volontariste et permet de se poser la question du degré de sévérité avec lequel doivent être traitées les affectations des zones aux classes (Roy et Bouyssou, 1998). Aucune des valeurs de λ n'est meilleure qu'une autre ; cependant ce paramètre doit être au moins supérieur à 0,5. Nous avons testé les quatre valeurs ci-contre : 0,65 ; 0,75 et 0,85.

6.4. Résultats

Avec $\lambda = 0,65$, les zones Z₁, Z₂, Z₆ et Z₉ ont été affectées en classe 1 ; les zones Z₃ et Z₄ en classe 2 ; Z₇ en classe 3 ; Z₅, Z₈ et Z₁₀ en classe 4.

Il est cependant nécessaire de mettre en évidence la robustesse du classement avec le changement du paramètre λ , le changement des jeux de poids et le changement des seuils.

Il résulte de cette étude que le classement des zones Z₃, Z₄ et Z₅ reste insensible aux changements de paramètres. Celui des autres zones oscille entre deux classes successives (voir tableau 4).

Par ailleurs, si le paramètre λ est trop important (0,85 par exemple) le principe de précaution maximum est exacerbé ; il s'en suit que les zones placées dans les classes 4 et 3 se retrouvent affectées à des classes de risque plus élevé, soit un glissement vers l'avant sur au plus trois classes successives.

7. Discussion et conclusions

Dans les premières phases de prise de décision et de planification, comme dans le cas de la hiérarchisation du risque d'effondrement minier, il est nécessaire de prendre appui sur

des méthodes et outils efficaces pour répondre à la demande de mise au point d'une cartographie de risque.

Ces dernières décennies ont connu un formidable développement des Systèmes d'Information Géographique (SIG), des utilitaires de collecte, d'archivage et d'analyse des données. Ces différents outils ont permis de réduire l'incertitude sur l'information et d'offrir une plus grande facilité de manipulation des informations. En parallèle, les méthodes d'aide à la décision viennent exploiter et formaliser les informations disponibles pour fournir aux décideurs et utilisateurs une base de concertation pour leurs problèmes quotidiens.

Dans ce contexte, la méthode d'aide multicritère à la décision ELECTRE TRI a permis de répondre aux besoins en matière de hiérarchisation du risque d'effondrement.

ELECTRE TRI tient compte de chaque critère dans l'explication du risque d'effondrement, en y intégrant incertitude et *mauvaise-connaissances*. La méthode fournit des conclusions qui servent de base de concertation entre décideurs et utilisateurs finaux.

Par ailleurs, la fiabilité de l'affectation aux classes de risque dépend de plusieurs facteurs dont : la fiabilité des entrées ; la taille du bassin étudié ; l'expérience des parties prenantes dans l'étude (les experts et modélisateurs) ; la pertinence du modèle ou de la méthode utilisée. De plus, ces facteurs interagissent entre eux.

La seule manière de vérifier la fiabilité des données serait de faire des mesures in situ. Mais, au stade des premières phases de planification où des décisions doivent être prises rapidement, la vérification in situ des données est exclue pour des raisons de temps et de coût.

La fiabilité des résultats, c'est à dire des affectations des zones aux quatre classes de risque, n'est possible qu'en observant, au cours du temps, l'évolution des zones étudiées. A ce titre, il est nécessaire de préciser que la méthode utilisée n'entend pas fournir une prédiction dans l'ordre chronologique de l'effondrement minier, mais plutôt, une évaluation ou une estimation du risque, compte tenu des informations à disposition et des savoir et savoir faire des experts.

Dans ce contexte, la démarche d'aide multicritère à la décision ELECTRE TRI fournit des résultats qui doivent faire l'objet d'une analyse de sensibilité sur les différents paramètres comme les jeux de poids, les seuils, l'indice de coupe λ avant de fournir des conclusions robustes.

La méthodologie de hiérarchisation du risque d'effondrement minier a été appliquée sur près de 320 zones à l'aplomb du bâti et des infrastructures.

Bibliographie

- Andenmatten A. (1995). *Evaluation du risque de défaillance des émetteurs d'obligations : une approche par l'aide à la décision* ; Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, pp. 167-168.
- Arondel C., Girardin P. (2000). *Sorting cropping systems on the basis of their impact on groundwater quality*, European Journal of Operational Research, Volume 127, Issue 3, pp. 467-482.

- Cour des comptes. (2000). *La fin des activités minières, Rapport au président de la république suivi des réponses des administrations et des organismes intéressés*, pp. 10, pp. 20-36 et pp. 58-69.
- Dikau R., Cavallin a., Jager S.(1996). *Databases and GIS for Landslide research in Europe*, *Geomorphology* 15(3-4), pp. 227-239.
- Homand F., Feuga B., Kouniali S., Josien J.-P. (2001). *Les instabilités des mines de fer abandonnées de Lorraine*, XVème Congrès Français de Mécanique, Nancy, pp. 715-721.
- Merad M. M. (2000). *Contribution à l'élaboration d'une méthodologie de Hiérarchisation des zones à risque d'effondrement minier :Application au bassin ferrifère Lorrain*, Mémoire de DEA 103, Paris Dauphine.
- Montovani F., Soeters R., Van Westen C. J. (1996). *Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe*, *Geomorphology* 15, pp. 213-225.
- Mousseaux V. (2002). *Valued outranking relations in ELECTRE providing manageable disaggregation procedures*, Cahier du LAMSADE, Université de Paris Dauphine.
- Roy B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*, Paris, Economica.
- Roy B., Bouyssou D. (1992). *Aide multicritère à la décision*, Paris, Economica, pp. 389-401.
- Roy B., Slowinski R., Treichel W. (1992). *Multicriteria programming of water supply systems for rural areas*, *Water Resources Bulletin*, American Water Resources Association, Vol. 28, NO.1, pp. 13 - 31.
- Roy B., Figuera J. (1998). *Détermination des poids des critères dans les méthodes de type ELECTRE avec la technique de Simos révisée*, Cahier 109 du LAMSADE, Université de Paris Dauphine.
- Roy B. (2002). *Présentation et interprétation de la méthode ELECTRE TRI pour affecter des zones dans des catégories de risque*, Cahier du LAMSADE, Université de Paris Dauphine.
- Soeters R., Van Westen C. J. (1996). *Slope instability recognition, analysis, and zonation, Landslides, Investigation and mitigation*, Special report 247, Transportation research board, National Research Council, pp. 129-177.
- Varnes, D.J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. *Natural Hazards*, No.3, UNESCO, Paris, pp. 63-65.
- Wu T. H., Tang W. H., Einstein H. H. (1996) *Landslide hazard and risk assessment, Investigation and mitigation*, Special report 247, Transportation research board, National Research Council, pp. 129-177.
- Yu W. (1992). *Aide multicritère à la décision dans le cadre de la problématique du tri*, Thèse de doctorat, Université Paris Dauphine.