

# Contribution de la méthode ELECTRE TRI à la hiérarchisation de zones à risque induit par la présence d'ouvrages miniers abandonnés. Application au bassin ferrifère lorrain

**M. MERAD  
B. ROY**

LAMSADE  
Laboratoire d'analyse  
et modélisation de systèmes  
pour l'aide à la décision  
UMR 7024  
Université  
de Paris IX-Dauphine  
75775 Paris Cedex  
myriam.merad@ineris.fr

**T. VERDEL**

LAEGO  
Laboratoire Environnement,  
Géomécanique et Ouvrages  
École des mines de Nancy  
54000 Nancy  
thierry.verdel@mines.inpl-  
nancy.fr

**S. KOUNIALI**

INERIS, Institut national  
de l'environnement  
industriel et des risques  
Parc technologique  
Alata BP 2  
60550 Verneuil-en-Halatte  
samy.kouniali@ineris.fr

## Résumé

Une méthodologie de gestion à long terme du risque d'effondrement minier sous bâti et 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. Chacune des quatre classes de risque prédéfinies renvoie à la mise en place de dispositifs de surveillance appropriés, classes auxquelles sont affectées les zones étudiées.

*Mots-clés* : risque, affaissement, incertitudes, multicritère, ELECTRE TRI.

## Contribution of the ELECTRE TRI method for the hierarchization of zones at risk due to abandoned underground mining works. Application to the Lorraine iron basin (France)

## 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 systems.

*Key words* : risk, collapse, uncertainty, multiple criteria, ELECTRE TRI.

## Introduction

Les affaissements miniers survenus récemment en Lorraine, à l'aplomb de mines de fer abandonnées, ont causé d'importants dommages aux bâtiments et infrastructures de surface (Homand *et al.*, 2001 ; Deck *et al.*, 2003). Ils ont conduit à une prise de conscience collective de la gravité des problèmes humains, techniques, et financiers liés à l'après-mine (Cour des comptes, 2000). Cette prise de conscience a donné naissance à un pôle d'appui à l'administration du nom de GEODERIS<sup>1</sup> et à un groupement de recherche dénommé GISOS<sup>2</sup> constitué par l'INERIS, le BRGM, l'INPL<sup>3</sup> à travers le LAEGO et l'École des mines de Paris.

D'une superficie d'environ 1 800 km<sup>2</sup>, le bassin ferrifère lorrain a été exploité pendant près d'un siècle (Varoquaux, 1995) et jusqu'en 1997 en employant la méthode des chambres et piliers qui permet le maintien des terrains sous les zones urbanisées. La défaillance de cette stratégie technique de protection nécessite la mise en place d'une stratégie managériale de prévention basée sur l'analyse de risque.

Dans la terminologie habituelle, le *risque* naît de la rencontre d'un *aléa* et d'*enjeux*. Il est généralement défini comme l'estimation des dommages résultant de l'occurrence d'un événement au cours d'une période donnée sur un site donné. Il prend généralement la forme de la combinaison multiplicative Aléa & Vulnérabilité (Varnes, 1984 ; UN, 1992 ; MATE, 1997).

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) (MATE, 1997 ; 1999). Cependant, alors qu'ils sont de plus en plus souvent disponibles dans des zones de carrières (Didier, 1999), les PPR sont encore en 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. Jusqu'à présent, les cartographies de risque sont rares à cause de la difficulté d'évaluation quantitative de l'aléa et surtout 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 (Wu *et al.*, 1996 ; Soeters et Van Westen, 1996).

Issues des méthodes d'aide à la décision, les méthodes ELECTRE (Roy, 1985) permettent de résoudre en partie ces difficultés. Nous présentons ainsi, dans le contexte des risques liés aux affaissements miniers, une méthodologie de hiérarchisation de zones à risque, s'appuyant sur la méthode d'aide multicritère à la décision ELECTRE TRI (Roy et Bouyssou, 1992 ; Yu, 1992). Cette méthodologie a pour but d'affecter les zones concernées à l'une des quatre classes de risque définies par un groupe d'experts, auxquelles correspondent des dispositifs différents à mettre en place pour la surveillance de ces zones (Homand *et al.*, 2001).

Nous présentons dans un premier temps la procédure de sélection des zones étudiées et les critères rete-

nus pour la hiérarchisation de ces zones. Puis, nous explicitons le principe de la hiérarchisation basé sur la méthode ELECTRE TRI. Enfin, nous illustrons le déroulement de la méthode sur un échantillon de 10 zones.

## Zones à risques et critères de hiérarchisation

Le bassin ferrifère lorrain a fait l'objet d'un vaste travail d'archivage aboutissant à la mise au point d'un système d'informations géographiques (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 1 à partir des informations contenues dans le SIG.

Les données disponibles pour chaque zone sont soit quantitatives (taux de défrètement, profondeur, sollicitation, ouverture...) soit qualitatives (présence de faille, nature de l'intercalaire...). Ces données servent, d'une part, à l'identification de zones dites homogènes (présentant des caractéristiques constantes dans leur périmètre) et, d'autre part, à la sélection des zones dites à risque (présentant une prédisposition à l'occurrence d'un effondrement à l'aplomb de structures ou d'infrastructures de surface).

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 renseignés sur chaque zone retenue pour l'étude de hiérarchisation. Le risque d'effondrement minier peut donc être représenté sous une forme *multicritère*. Ces critères (Tableau I), 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 » (Merad, 2000). 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 en surface par la rupture et d'autre part une estimation de l'importance des enjeux ou des dommages prévisibles (ici dénommés vulnérabilité).

Deux jeux de critères différents ont été utilisés pour distinguer les zones sous bâti des zones sous infrastructures (Tableau I). Si bâti et infrastructures coexistent à la surface d'une zone, on utilisera par précaution le jeu de critères destinés aux zones sous bâti, jugées par convention plus vulnérables que les zones sous infrastructures. Les critères regroupés sous la rubrique *prédisposition à la rupture de l'ouvrage minier* (Tableau I) sont communs aux deux jeux de critères. La distinction vient des critères de *sensibilité de la surface* où, pour les zones sous bâti, les critères concernés sont  $g_{2,1}$  à  $g_{2,4}$  et  $g_{2,5,1}$  et pour les zones sous infrastructures,  $g_{2,1}$  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 exprimés dans des unités différentes. Par exemple,  $g_{1,1}$  qui désigne la *sollicitation sur pilier* est estimé en (MPa) et  $g_{2,2}$  qui représente la *profondeur* en (m). Les critères restant sont qualitatifs et à chaque état est attribuée une codification numérique. Ainsi, le critère *superposition des piliers* peut présenter les états suivants : (0) une couche exploitée ; (10) deux couches avec piliers bien superposés ou intercalaire épais ( $\geq 6$  m) ; (40) deux couches avec piliers mal

<sup>1</sup> Groupement d'intérêt public, constitué par l'INERIS et le BRGM.

<sup>2</sup> Groupement de recherche sur l'impact et la sécurité des ouvrages souterrains.

<sup>3</sup> Institut national polytechnique de Lorraine.

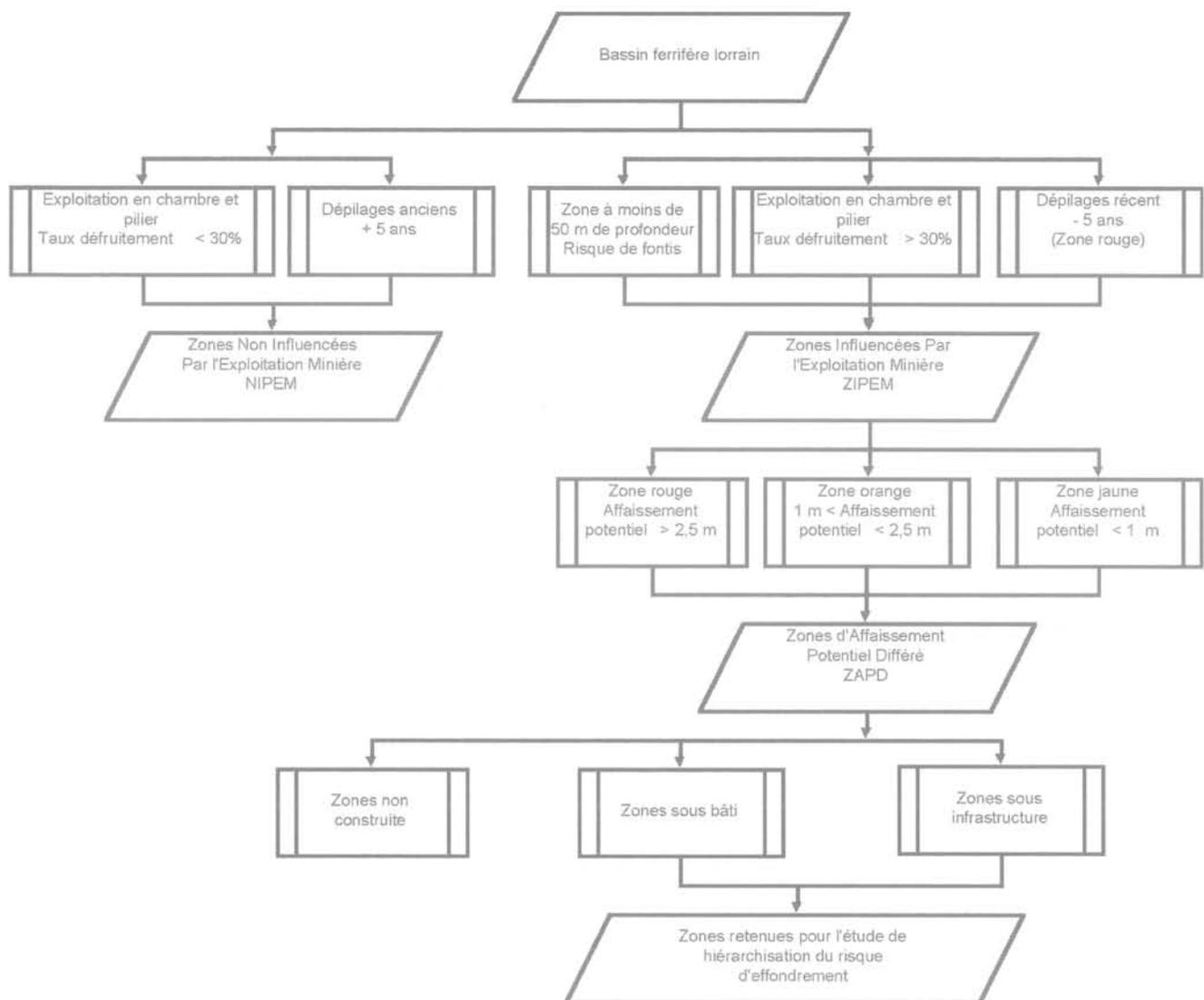


FIG. 1 Procédure de sélection des zones à risque d'effondrement à hiérarchiser.

superposés et intercalaire mince (< 6 m). Le tableau II montre un exemple d'évaluation d'une zone particulière sur l'ensemble des critères. On appelle  $g_j(Z_i)$  la performance de la zone  $Z_i$  sur le critère  $g_j$ .

Le poids des critères  $k_j$  (Tableau I) a été déterminé en présence d'experts et d'utilisateurs du SIG (Merad, 2000). Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer 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 utilisée est celle dite *des cartes* (Roy et Figuera, 2002). Les avantages, non exhaustifs, de cette méthode révisée de Simos (1990a, 1990b) sont d'éviter que des critères soient éliminés en leur attribuant un poids nul et de prendre en compte différentes pondérations dictées par les intérêts et les domaines de compétences de chacun des intervenants.

Il s'agit maintenant de passer, pour chaque zone  $Z_i$ , d'une évaluation partielle du risque, critère par critère, à une évaluation globale du risque.

### 3

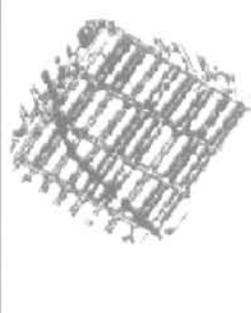
## Méthodologie d'évaluation globale du risque

Parmi les méthodes de type ELECTRE, la méthode ELECTRE TRI (Roy et Bouyssou, 1992) est utilisée pour affecter les zones sélectionnées à l'une des quatre classes de risque d'effondrement préalablement définies par un comité d'experts. 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 (Merad, 2000). Dans la méthode ELECTRE TRI, les classes sont séparées par un profil de classe bas,  $Pr_h$  ( $h$  allant de 1 à 3), ayant valeur de zone fictive.  $Pr_h$  représente une norme d'entrée à l'une des classes de risque (Fig. 2). En pratique, les profils  $Pr_h$  ont été identifiés à la suite d'analyses de données sur un échantillon de zones de référence (52 zones sous bâti et 69 zones sous infrastructures) affectées aux quatre classes de risque et validées par un comité d'experts.

TABLEAU I Famille de critères choisie.

N°	Critère	Nature	Unité	Sens de l'accroissement du risque	Poids des critères sous bâti $k_j$	Poids des critères sous infrastructures $k_j$
<b>G1</b>	<b>Prédisposition à la rupture de l'ouvrage minier</b>					
$g_{1,1}$	sollicitation corrigée	Quantitatif	MPa	+	5	5
$g_{1,2}$	présence de faille	Qualitatif	(codage)	+	1	1
$g_{1,3}$	superposition des piliers	Qualitatif	(codage)	+	1	1
$g_{1,4}$	taille et régularité des piliers	Qualitatif	(codage)	+	1	1
$g_{1,5}$	sensibilité à l'envoyage	Qualitatif	(codage)	+	5	5
<b>G2</b>	<b>Sensibilité de la surface</b>					
$g_{2,1}$	profondeur	Quantitatif	m	-	1	1
$g_{2,2}$	affaissement maximum attendu	Quantitatif	m	+	1	1
$g_{2,3}$	déformation	Quantitatif	mm/m	+	20	20
$g_{2,4}$	étendue de la zone	Quantitatif	hectare	+	1	4
$g_{2,5,1}$	vulnérabilité du bâti	Qualitatif	(codage)	+	10	sans objet
$g_{2,5,2}$	vulnérabilité des routes	Qualitatif	(codage)	+	sans objet	4
$g_{2,5,3}$	vulnérabilité des voies ferrées	Qualitatif	(codage)	+	sans objet	4
$g_{2,5,4}$	vulnérabilité des ouvrages d'art	Qualitatif	(codage)	+	sans objet	4
$g_{2,5,5}$	vulnérabilité des réseaux divers	Qualitatif	(codage)	+	sans objet	2

TABLEAU II Exemple d'évaluation d'une zone Z sur l'ensemble des critères de hiérarchisation.

	Plan de la surface	Formules de calcul	Renseignement des critères
	Etendue de la zone = 2.9 hectares Présence de lotissement, de maisons isolées et d'une route nationale		$g_{2,4}(Z) : 2.9$ hectares $g_{2,5,1}(Z) : 10$
	Plan du fond	Formules de calcul	Renseignement des critères
	Zone défilée à 35 % Profondeur min = 172 m Profondeur max = 177 m Accidents géologiques : non constatés Piliers gros et réguliers Exploitation monocouche en couche grise Présence d'un défilage en bordure Ouverture de 4 m	Sollicitation corrigée : $1.2 \cdot 0.25 \cdot \text{Profondeur max} / (1 - \text{Taux de ruissellement})$ .  Affaissement maximum attendu : Déduit à partir des courbes d'affaissement.  Déformation maximum : Paramètre $\alpha \cdot \text{Affaissement} / \text{Profondeur}$ . Paramètre $\alpha$ varie entre 0.75 et 1.5	$g_{1,1}(Z) : 8.17$ MPa $g_{1,2}(Z) : 0$ $g_{1,3}(Z) : 0$ $g_{1,4}(Z) : 0$ $g_{1,5}(Z) : 10$ $g_{2,1}(Z) : 172$ m $g_{2,2}(Z) : 0.8$ m $g_{2,3}(Z) : 4.93$ mm/m

Les classes étant nécessairement exclusives et ordonnées (avec la méthode ELECTRE TRI) et la classe 1 étant la plus risquée, le profil  $Pr_1$  présente alors, 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  $Pr_3$  (Fig. 3).

L'ensemble des comparaisons, sur chaque critère  $g_j$ , entre l'évaluation d'une zone  $Z_i$  et chaque profil  $Pr_h$  fournit une réponse partielle à l'entrée d'une zone dans

une classe de risque  $h$  (Figs. 2 et 3). Les données étant entachées d'incertitudes, ELECTRE TRI permet de les prendre en compte à travers l'introduction de deux seuils (Roy, 1985 ; Roy et Bouyssou, 1992) : le seuil d'indifférence  $q_j$  et le seuil de préférence  $p_j$ . Ils représentent respectivement la marge d'incertitude minimale et maximale liée à la nature des données et aux calculs à réaliser et sont définis de la manière suivante (Fig. 4) :

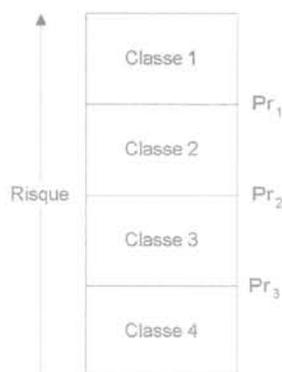


FIG. 2 Quatre classes de risque d'effondrement séparées par trois profils bas  $Pr_h$ .

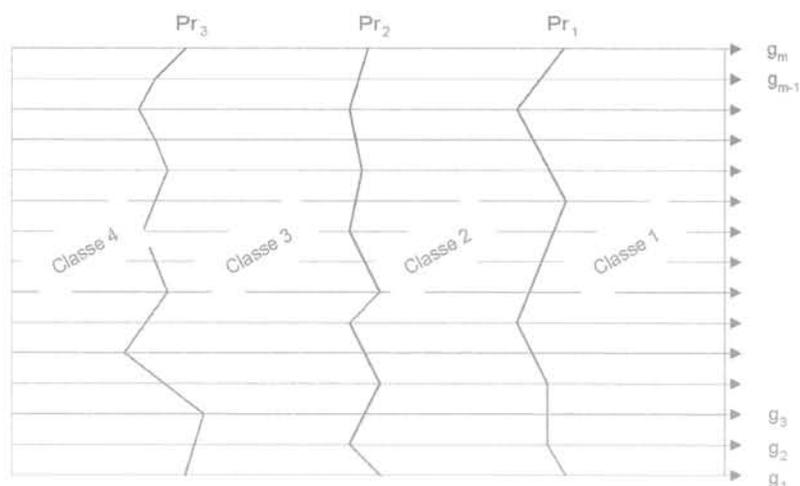


FIG. 3 Position de principe des profils de classe  $Pr_h$  sur chaque critère  $g_j$ .



FIG. 4 Trois situations de comparaison, sur un critère  $j$ , entre une zone  $Z$  et un profil  $Pr$  (S) au moins aussi risqué que, (I) indifférence, (Q) faiblement plus risqué et (P) strictement plus risqué.

– si  $|g_j(Z_i) - g_j(Pr_h)|$  est inférieure à  $q_j$ , on considère que cette différence n'est pas significative et que  $g_j(Z_i)$  et  $g_j(Pr_h)$  sont pratiquement équivalents ; on dira alors que la zone  $Z_i$  et le profil bas de la classe  $h$ ,  $Pr_h$ , sont *indifférents* ( $I_j$ ) du point de vue du critère  $g_j(Z_i, I_j, Pr_h)$  ;

– si  $|g_j(Z_i) - g_j(Pr_h)|$  est supérieure à  $p_j$ , on considère que cette différence est significative ; dans le cas où  $g_j(Z_i)$  est supérieur à  $g_j(Pr_h)$ , on dira que la zone  $Z_i$  est *strictement plus risquée* que le profil bas de la classe  $h$ ,  $Pr_h$ , pour le critère  $g_j(Z_i, P_j, Pr_h)$  ;  $Pr_h$  est *strictement plus risqué* ( $P_j$ ) que  $Z_i$  dans le cas inverse ( $Pr_h, P_j, Z_i$ ) ;

– si le seuil de préférence  $p_j$  n'est pas égal au seuil d'indifférence  $q_j$ , l'intervalle entre ces deux valeurs représente une plage d'ambiguïté dans laquelle le risque est présumé être plus élevé sans que la différence  $|g_j(Z_i) - g_j(Pr_h)|$  puisse être jugée véritablement significative. On dira que la zone  $Z_i$  est *faiblement plus risquée* ( $Q_j$ ) que  $Pr_h$  pour le critère  $g_j(Z_i, Q_j, Pr_h)$  ;  $Pr_h$  est *faiblement plus risqué* que  $Z_i$  dans le cas inverse ( $Pr_h, Q_j, Z_i$ ).

Par convention, si une zone est indifférente à un profil bas d'une classe, la zone est alors affectée à cette classe : on dira que la classe de risque est fermée par le bas (Roy, 2002). De ce fait, si une zone  $Z_i$  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  $h$ . Ce cas n'est cependant que rarement rencontré.

Deux logiques extrêmes de tri aux classes de risque sont alors possibles : soit  $Z_i$  est affectée dans la classe

la plus basse rencontrée sur un critère, soit  $Z_i$  est affectée dans la classe la plus haute rencontrée sur un critère. Ces deux logiques impliquent un principe de prudence qui est, dans le premier cas, minimum et, dans le deuxième cas, maximum. Pour atténuer ces deux logiques, 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*  $\sigma$  est introduit (annexe). Cet indice, qui prend une valeur comprise entre 0 et 1, agrège, en tenant compte des poids, les comparaisons partielles, critère par critère, et exprime la crédibilité avec laquelle on peut considérer globalement qu'une zone  $Z_i$  est plus risquée qu'un profil  $Pr_h$ . On dira dans ce cas que la zone surclasse (S) le profil. Quand cet indice vaut 1, cela signifie que l'assertion «  $Z_i$  est plus risquée que  $Pr_h$  » est complètement crédible (crédibilité de 100 % résultant de l'adhésion de tous les critères à cette assertion). Quand il vaut 0, cela signifie que cette assertion n'est pas du tout crédible (crédibilité de 0 % résultant du rejet de l'assertion par tous les critères ou par un seul des critères qui impose son veto). Quand il prend une valeur comprise entre 0 et 1, cela signifie que les « avis » sont partagés (certains critères valident l'assertion tandis que d'autres s'y opposent). L'indice de crédibilité exprime alors la force avec laquelle les critères favorables s'expriment, corrigée de la force opposée du ou des critères défavorables. Quand il est supérieur à 0,5, cela signifie qu'une majorité absolue de critères est favorable à l'assertion. L'indice de crédibilité qui permet de juger de cette relation de surclassement est noté  $\sigma(Z_i, Pr_h)$ . Dans ELECTRE TRI, on doit également calculer l'indice de crédibilité de la relation inverse, noté  $\sigma(Pr_h, Z_i)$ , car le calcul de cet indice n'est pas commutatif (voir annexe).

Pour juger de l'entrée ou non d'une zone  $Z_i$  dans une classe  $h$ , l'indice de crédibilité  $\sigma(Z_i, Pr_h)$  est comparé à un paramètre  $\lambda$  (compris entre 0,5 et 1) qui exprime le niveau d'exigence souhaité pour valider cette entrée. Par exemple, un  $\lambda = 0,6$  signifie qu'on souhaite qu'au moins 60 % des critères (poids compris) soient favorables à l'entrée dans la classe. Trois situations sont possibles et seules possibles :

– l'indifférence :  $\sigma(Z_i, Pr_h) \geq \lambda$  et  $\sigma(Pr_h, Z_i) \geq \lambda \Rightarrow Z_i I Pr_h$  ;

– la préférence stricte ( $Z_i$  est strictement plus risquée que  $Pr_h$  ou l'inverse) :

$$\sigma(Z_i, Pr_h) \geq \lambda \text{ et } \sigma(Pr_h, Z_i) < \lambda \Rightarrow Z_i P Pr_h;$$

$$\sigma(Pr_h, Z_i) \geq \lambda \text{ et } \sigma(Z_i, Pr_h) < \lambda \Rightarrow Pr_h P Z_i;$$

– l'incomparabilité :  $\sigma(Z_i, Pr_h) < \lambda$  et  $\sigma(Pr_h, Z_i) < \lambda \Rightarrow Z_i R Pr_h$ .

Parmi les deux procédures de tri offertes par la méthode ELECTRE TRI, la *pseudo-disjonctive* est la plus prudente. Cette procédure consiste à affecter une zone  $Z_i$  à une classe  $h$ , si :

–  $Z_i$  présente un niveau de risque strictement plus élevé que le profil bas  $Pr_h$  ( $Z_i P Pr_h$ ),  $Z_i$  et le profil bas  $Pr_h$  présentent le même niveau de risque ( $Z_i I Pr_h$ ), ou  $Z_i$  et le profil bas  $Pr_h$  présentent des niveaux de risque incomparables ( $Z_i R Pr_h$ ) ;

– et si aucune des situations précédentes n'est valable quand on compare  $Z_i$  et le profil  $Pr_{h-1}$  (profil bas de la classe  $h-1$ ).

Dès l'instant où la première condition est vérifiée par un profil  $Pr_h$ , elle l'est aussi par tous les profils « inférieurs » ( $Pr_{k>h}$ ).

La classe  $h$  d'affectation peut donc être caractérisée par la plus grande valeur de  $h$  telle que  $Pr_{h-1}$  viole la première condition. Ceci correspond au profil le plus bas tel que  $Pr_{h-1}$  présente un niveau de risque strictement plus élevé que  $Z_i$ .

#### 4

## Mise en œuvre de la méthode ELECTRE TRI

Nous proposons maintenant d'appliquer la méthode de hiérarchisation du risque d'effondrement minier à un échantillon de dix zones à risque (Tableau III).

Notons que cette méthode a été développée pour faire face à des situations bien plus complexes où un nombre important de zones doit être traité.

Les dix zones proposées sont des zones sous bâti. Des analyses de dispersion des données (incertitudes, erreurs de mesure, etc.) ont permis de définir des seuils d'indifférence  $q_j$  et de préférence  $p_j$  sur chacun des critères. Ces seuils sont donnés dans le tableau III.

La méthode ELECTRE TRI a été mise en œuvre au moyen du logiciel ELECTRE TRI version 2.0 (Mousseau *et al.*, 1999). Ce logiciel propose les deux procédures d'affectation aux classes de risque d'effondrement sous le nom de *procédure pessimiste* et *procédure optimiste*. La procédure *pseudo-disjonctive* de la méthodologie ELECTRE TRI correspond à la *procédure optimiste* avec le logiciel ELECTRE TRI.

Pour chacune des dix zones du tableau III, 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 IV.

Le paramètre  $\lambda$ , qui permet d'ajuster les affectations des zones aux classes de risque, est choisi par l'utilisateur et permet de se poser la question du degré de sévérité (ou de l'exigence) avec lequel doivent être traitées les affectations des zones aux classes (Roy et Bouyssou, 1992).  $\lambda$  doit être supérieur à 0,5 pour signifier que, pour valider une affectation d'une zone à une classe, il est nécessaire que plus de la moitié des critères valide l'assertion compte tenu de leur poids respectif. Les poids étant différents, il est important de ne pas laisser la décision à un seul critère, fut-il le plus important. Dans ce cas,  $\lambda$  doit être choisi supérieur ou égal à  $[1 - k_{\max}/\sum k_j]$  soit ici 0,57 (Roy, 2002). Quand les valeurs du paramètre  $\lambda$  sont supérieures à 0,57, aucune des valeurs de  $\lambda$  n'est considérée meilleure qu'une autre. Nous avons testé dans cet exemple les cinq valeurs ci-contre : 0,60, 0,65, 0,70, 0,75 et 0,85.

TABLEAU III Évaluations des zones sur chaque critère.

Zones	Critères									
	$g_{1,1}$ MPa	$g_{1,2}$ -	$g_{1,3}$ -	$g_{1,4}$ -	$g_{1,5}$ -	$g_{2,1}$ m	$g_{2,2}$ m	$g_{2,3}$ mm/m	$g_{2,4}$ hec.	$g_{2,5,1}$ -
$Z_1$	5,8	10	0	20	0	35	2,37	6,8	3,6	20
$Z_2$	4,8	0	40	0	0	70	1,28	1,83	0,2	10
$Z_3$	9,7	10	10	0	30	200	1,67	0,84	7,4	30
$Z_4$	10,4	10	10	10	30	203	1,68	0,83	9	20
$Z_5$	9,7	0	10	0	10	222	1,2	0,54	1,8	20
$Z_6$	9,8	10	0	20	0	50	1,27	2,54	6,7	20
$Z_7$	12,3	0	0	0	30	155	0,96	0,61	14,1	10
$Z_8$	11,2	10	0	0	30	180	0,71	0,39	6,4	20
$Z_9$	11,3	0	40	20	0	115	2,18	1,89	2,5	10
$Z_{10}$	11,0	10	0	10	30	170	0,31	0,18	2,6	20
Profils										
$Pr_1$	14	10	40	20	0	10	1,8	1	35	30
$Pr_2$	10	10	10	10	10	150	1,4	0,82	20	20
$Pr_3$	8	0	10	10	10	190	1	0,63	6	20
Seuils										
$q_j$	05	0	0	0	0	10	0,1	0,05	0,5	0
$p_j$	1	0	0	0	0	20	0,2	0,09	1	0
Poids										
$K_j$	5	1	1	1	5	1	1	20	1	10

Considérons l'exemple de la zone  $Z_1$  avec  $\lambda = 0,65$  (Tableau IV). On constate que lors de la comparaison de cette zone au profil bas de la classe 3 ( $Pr_3$ ), l'indice de crédibilité  $\sigma(Z_1, Pr_3)$  est égal à  $0,717 > 0,65$  et  $\sigma(Pr_3, Z_1)$  est égal à  $0,500 < 0,65$ ; de ce fait  $Z_1$  peut rentrer en classe 3. Si nous poursuivons la comparaison avec le profil bas de la classe 2 ( $Pr_2$ ), l'indice de crédibilité  $\sigma(Z_1, Pr_2)$  est égal à  $0,717 > 0,65$  et  $\sigma(Pr_2, Z_1)$  est égal à  $0,522 < 0,65$ ;  $Z_1$  peut donc rentrer en classe 2. La comparaison de  $Z_1$  avec le profil bas de la classe 1 ( $Pr_1$ ) révèle que l'indice de crédibilité  $\sigma(Z_1, Pr_1)$  est égal à  $0,500 < 0,65$  et  $\sigma(Pr_1, Z_1)$  est égal à  $0,544 < 0,65$ ;  $Z_1$  est donc incomparable avec le profil  $Pr_1$ , elle est donc affectée en classe 1 (du fait du choix de la procédure pseudo-disjonctive).

Procédant de la même manière avec l'ensemble des zones, et avec  $\lambda = 0,65$ , les zones  $Z_1, Z_2, Z_6$  et  $Z_9$  sont affectées en classe 1; les zones  $Z_3$  et  $Z_4$  en classe 2; la zone  $Z_7$  en classe 3; les zones  $Z_5, Z_8$  et  $Z_{10}$  en classe 4 (Tableau IV).

Pour tester la robustesse du classement obtenu, il est nécessaire d'effectuer des analyses de sensibilité au changement de valeur du paramètre  $\lambda$ , des seuils (d'indifférence et de préférence) et des poids. Considérons l'exemple d'une analyse de sensibilité sur le paramètre  $\lambda$  et prenons le cas de la zone  $Z_3$ . Soit  $\lambda = 0,7$ . On constate que  $\sigma(Z_3, Pr_3) = 0,956 > 0,7$  et  $\sigma(Pr_3, Z_3) = 0,065 < 0,7$ ;  $Z_3$  peut rentrer en classe 3. En comparant  $Z_3$  à la limite d'entrée de la classe 2, on constate que  $\sigma(Z_3, Pr_2) = 0,913 > 0,7$  et  $\sigma(Pr_2, Z_3) = 0,674 < 0,7$ ;  $Z_3$  peut entrer en classe 2. Pour finir,  $Z_3$  est comparée à la limite d'entrée à la classe 2  $Pr_1$ , ce qui donne:  $\sigma(Z_3, Pr_1) = 0,384 < 0,7$  et  $\sigma(Pr_1, Z_3) = 0,891 > 0,7$ ;  $Z_3$  ne peut donc pas entrer en classe 1 et reste en classe 2. Ainsi, en faisant varier la valeur du paramètre  $\lambda$  de  $0,65$  à  $0,7$ , la classe d'affectation de  $Z_3$  n'a pas changé. On dit alors que la conclusion n'est pas sensible à cette variation de la valeur de  $\lambda$ ; elle sera dite *stable* dans le tableau IV.

Cette analyse est effectuée de manière similaire sur les différentes valeurs de  $\lambda$  et différentes valeurs possibles de seuils de préférence et d'indifférence. Les résultats de cette étude sont synthétisés dans la dernière colonne du tableau IV. Il en résulte que le classement des zones  $Z_3, Z_4$  et  $Z_5$  demeure insensible aux changements de paramètres. Celui des autres zones oscille entre deux classes successives (Tableau IV).

## 5

## Discussion et conclusion

L'analyse du risque sur le bassin ferrifère lorrain nécessite de prendre appui sur des méthodes et outils efficaces pour répondre à l'urgence avec laquelle doit parfois être géré le risque. Ces dernières décennies ont connu un formidable développement des systèmes d'informations géographiques, 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 (Soeter et Van Westen, 1996).

Dans ce contexte, la méthode d'aide multicritère à la décision ELECTRE TRI a permis de répondre aux besoins de la hiérarchisation du risque d'effondrement minier. Cette méthode permet de formaliser la connaissance experte à travers des critères qui contribuent tous à l'explication du risque même quand la connaissance des phénomènes en jeu est partielle ou imprécise. Elle permet en outre de gérer l'incertitude sur les données (Roy, 1985; Roy et Bouyssou, 1992). Les conclusions fournies par ELECTRE TRI servent alors

TABLEAU IV Indices de crédibilité  $\sigma(Z_i, Pr_h)$  et  $\sigma(Pr_h, Z_i)$  et résultats des analyses de sensibilité.

$\sigma(Z_i, Pr_h)$ $\sigma(Pr_h, Z_i)$	$Pr_3$	$Pr_2$	$Pr_1$	Affectation des zones aux classes à risque avec $\lambda = 0,65$	Analyses de sensibilité
$Z_1$	0,717 0,500	0,717 0,522	0,500 0,544	Classe 1	Classe 1 et 2
$Z_2$	0,500 0,522	0,478 0,522	0,478 0,544	Classe 1	Classe 1 et 2
$Z_3$	0,956 0,065	0,913 0,674	0,348 0,891	Classe 2	Stable
$Z_4$	0,972 0,283	0,935 0,891	0,130 0,891	Classe 2	Stable
$Z_5$	0,565 0,891	0,456 1,000	0,000 1,000	Classe 4	Classes 3 et 4
$Z_6$	0,848 0,383	0,826 0,522	0,500 0,544	Classe 1	Classes 1 et 2
$Z_7$	0,717 0,739	0,239 0,783	0,109 0,891	Classe 3	Classes 3 et 4
$Z_8$	0,500 0,761	0,456 0,783	0,130 0,891	Classe 4	Classes 3 et 4
$Z_9$	0,630 0,391	0,609 0,391	0,489 0,565	Classe 1	Classes 1 et 2
$Z_{10}$	0,500 0,717	0,478 0,783	0,130 0,891	Classe 4	Stable

de base de concertation entre experts et décideurs. Leur robustesse dépend de plusieurs aspects, dont : la fiabilité des entrées quand la vérification *in situ* est exclue pour des raisons de temps et de coût ; la taille du bassin étudié ; l'expérience des parties prenantes dans l'étude (les experts et modélisateurs) ; la pertinence des modèles (Wu *et al.*, 1996). A cet effet, ELECTRE TRI impose des analyses de sensibilité sur les différents paramètres qu'elle exploite comme les poids, les seuils et l'indice de coupe  $\lambda$  avant de fournir des conclusions robustes.

Pour conclure, il est nécessaire de préciser que la méthode utilisée n'entend pas fournir une prévision en terme de délai d'occurrence de l'effondrement minier, mais plutôt, une évaluation du risque, compte tenu des informations à disposition et des savoirs et savoir-faire des experts formalisés dans le choix des critères et leurs pondérations. A ce jour, la méthodologie de hiérarchisation du risque d'effondrement minier a été appliquée sur près de 320 zones à l'aplomb de bâti et d'infrastructures.

## Bibliographie

- Cour des comptes – *La fin des activités minières*. Rapport au président de la République suivi des réponses des administrations et des organismes intéressés, 2000, p. 10, p. 20-36 et p. 58-69.
- Deck O., Al Heib M., Homand F. – Taking the soil-structure interaction into account in assessing the loading of a structure in a mining subsidence area. *Engineering Structures*, vol. 25, 2003, p. 435-448.
- Didier C. – Élaboration 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 internationale de la prévention des catastrophes naturelles*, Paris, session 2, 1999, p. 85-92.
- Homand F., Feuga B., Kouniali S., Josien J.P. – Les instabilités des mines de fer abandonnées de Lorraine. *XV<sup>e</sup> Congrès français de mécanique*, Nancy, 2001, p. 715-721.
- Merad M.M. – *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, 2000.
- Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement – *Plans de prévention des risques naturels (PPR) – Guide général*. La Documentation française, Paris, 1997.
- Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement – *Plans de prévention des risques naturels (PPR) - Risques de mouvements de terrains - Guide méthodologique*. La Documentation française, Paris, 1999.
- Mousseau V., Slowinski R., Zielniewicz P. – *ELECTRE TRI 2.0a : Methodological guide and user's documentation*. Document du LAMSADE n° 111, université de Paris-Dauphine, 1999.
- Roy B. – *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica, Paris, 1985.
- Roy B. – *Présentation et interprétation de la méthode ELECTRE TRI pour affecter des zones dans des catégories de risque*. Cahier du LAMSADE, université de Paris Dauphine, 2002.
- Roy B., Bouyssou D. – *Aide multicritère à la décision*. Economica Paris, 1992, p. 389-401.
- Roy B., Figuera J. – Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure. *European Journal of Operational Research*, vol. 139, Issue 2, 2002, p. 317-326.
- Simos J. – *L'évaluation environnementale : un processus cognitif négocié*. Thèse de doctorat, DGF-EPFL, Lausanne, 1990 (a).
- Simos J. – *Évaluer l'impact sur l'environnement : une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1990 (b).
- Soeters R., Van Westen C.J. – *Slope instability recognition, analysis, and zonation, landslides investigation and mitigation*. Special report 247, Transportation research board, National Research Council, 1996, p. 129-177.
- United Nations – Department of Humanitarian Affairs Internationally agreed glossary of basic terms related to Disaster Management, <http://www.unisdr.org/unisdr/glossaire.htm>, 1992
- Varnes D.J. – *Landslide hazard zonation : a review of principles and practice*. *Natural Hazards*, n° 3, Unesco, Paris, 1984, p. 63-65.
- Varoquaux J.A. – *Histoire d'une profession. Les mines de fer de France*. Chambre syndicale des mines de fer de France, 1995.
- Wu T.H., Tang W.H., Einstein H.H. – *Landslide hazard and risk assessment, Investigation and mitigation*. Special report 247, Transportation research board, National Research Council, 1996, p. 129-177.
- Yu W. – *Aide multicritère à la décision dans le cadre de la problématique du tri*. Thèse de doctorat, université Paris-Dauphine, 1992.

# Annexe

## Indice de crédibilité

Cet indice est déterminé à partir des critères  $g_j$  et 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 (Roy, 1985). 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* (Fig. 5). 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.

A titre d'exemple, posons-nous la question de la possibilité de l'entrée de la zone  $Z_3$  en classe 3. Ceci revient alors à la comparer au profil bas de la classe 3,  $Pr_3$ . Le tableau V montre que les valeurs de  $Z_3$  sur les critères  $g_{1,1}, g_{1,2}, g_{1,5}, g_{2,2}, g_{2,3}, g_{2,4}$  et  $g_{2,5,1}$  sont strictement plus élevées que celle de  $Pr_3$ , on peut alors dire que ces critères sont concordants avec le fait que  $Z_3$  soit *strictement plus risquée* ( $P_j$ ) que  $Pr_3$ . Donc  $c_j(Z_3, Pr_3) = 1$  sur

ces critères. Sur le critère  $g_{1,3}$ , les valeurs de  $Z_3$  et de  $Pr_3$  sont identiques. Sur le critère  $g_{2,1}$  l'écart entre la valeur de  $Z_3$  et  $Pr_3$  est de 10, valeur égale au seuil d'indifférence.  $Z_3$  et  $Pr_3$  sont alors *indifférents* ( $I_j$ ) pour ces critères et  $c_j(Z_3, Pr_3) = 1$ . Concernant le critère  $g_{1,4}$ , la valeur de  $Z_3$  est strictement inférieure à celle de  $Pr_3$ .  $Pr_3$  est donc *strictement plus risqué* ( $P_{1,4}$ ) que  $Z_3$ . Soit  $c_{1,4}(Z_3, Pr_3) = 0$ .

En multipliant les différents indices de concordance partielle par leur poids respectif et en divisant leur somme par le total des poids des critères (46), on obtient l'indice de concordance globale  $c(Z_3, Pr_3) = 0,976$ . L'indice de concordance globale  $c(Pr_3, Z_3)$  s'obtient de la même manière et donne la valeur 0,065 (Tableaux IV et V).

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  $y$  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  $Pr_h$  ».

Reprenons le cas de la zone  $Z_3$  comparée à  $Pr_3$ . Le tableau V n'indique pas de valeur de veto car nous avons choisi de l'éloigner considérablement du seuil de préférence  $p_j$ . Ainsi, aucun critère de la famille  $F$  ne peut exprimer un veto franc et remettre en question les critères concordants. Donc tendent vers 0.

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

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

Dans le cas notre exemple :

$$\sigma(Z_3, Pr_3) = c(Z_3, Pr_3) = 0,956 \text{ et } \sigma(Pr_3, Z_3) = c(Pr_3, Z_3) = 0,065$$

TABLEAU V Évaluation des zones sur chaque critère.

Zones	Critères									
	$g_{1,1}$ MPa	$g_{1,2}$	$g_{1,3}$	$g_{1,4}$	$g_{1,5}$	$g_{2,1}$ m	$g_{2,2}$ m	$g_{2,3}$ mm/m	$g_{2,4}$ hec.	$g_{2,5,1}$
$Z_3$	9,7	10	10	0	30	200	1,67	0,84	7,4	30
Profils $Pr_3$	8	0	10	10	10	190	1	0,63	6	20
Seuils										
$q_j$	0,5	0	0	0	0	10	0,1	0,05	0,5	0
$p_j$	1	0	0	0	0	20	0,2	0,09	1	0
Poids										
$k_j$	5	1	1	1	5	1	1	20	1	10
$c_j(Z_3, Pr_3)$	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
$c_j(Pr_3, Z_3)$	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
$c(Z_3, Pr_3)$	$(1(5+1) + 1(1+1) + 1(1+0) + 1(1+1) + 5(1+1) + 1(1+1) + 1(1+1 \times 20 + 1 \times 1 + 1 \times 10)) / 46 = 0,976$									
$c(Pr_3, Z_3)$	$(0(5+0) + 0(1+1) + 1(1+1) + 1(1+0) + 5(1+1) + 0(1+0 \times 1 + 0 \times 20 + 0 \times 1 + 0 \times 10)) / 46 = 0,065$									

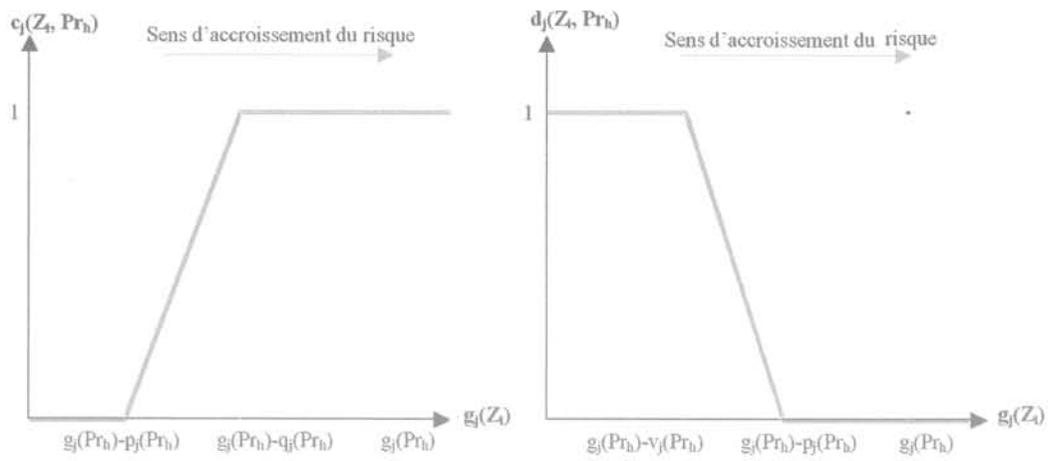


FIG. 5 Principe du calcul de l'indice de concordance partiel  $c_j$  et de l'indice de discordance  $d_j$ .