

## INVESTIGATIONS ET CARTOGRAPHIE DES ALEAS KARSTIQUES DANS UNE ZONE TECTONISEE COMPLEXE DES AVANT-MONTS DU JURA NORD-OCCIDENTAL (FRANCE)

Jacky MANIA <sup>1</sup>, Jacques MUDRY <sup>2</sup>, Paul BROQUET <sup>2</sup>, Pierre CHAUVE <sup>2</sup>,  
Rodolphe WACOGNE <sup>2</sup> & Alain DELHOMEL <sup>3</sup>

(6 figures, 2 tables)

1. *Université des Sciences et Technologies de Lille - Lab. Mécanique de Lille - EUDI - F-59655 VILLENEUVE D'ASCQ Cedex, e-mail : Jacky.Mania@eudil.fr*
2. *Université de Franche-Comté Laboratoire de Géologie Structurale & Appliquée, F-25000 BESANCON*
3. *SNCF Direction de l'Équipement et de l'Aménagement, 122 rue des Poissonniers, F-75876 PARIS Cedex 18*

**ABSTRACT.** Investigation and mapping of karstic risks of a complicated tectonic zone of the mountain front in north-west Jura (France). In the sector North West of the Jura Massif construction of the high speed train TGV required the definition of a method for resolving karstic hazards. The geographical zone, with a length of 140 km and 1 km width, spreads between the valleys of the Saône to the West and of the Savoureuse river to the East. This sector includes some thrust faults and transverse faults affecting karstified limestones dated Triassic to upper Jurassic. Numerous dissolution forms were associated to water flows. 110 springs, 206 dolines, 6 underground caves and 21 swallow holes were noted. Different types of maps have been plotted: geomorphological features, diameter size of dolines and depth of dolines. The synthetic map of karstic risks is a combination of the three previous maps and shows various zones indexed by 3 digits. The value of the total surface  $S_{tr}$  is assessed for each mapsheet. The zonal risk coefficient  $R$  is provided for each mapsheet by  $R = S_1 \cdot a_1 + \dots + S_n \cdot a_n$  where  $S_i$  is the surface of the zone number  $i$ ,  $a_i$  is the weighting factor of the zone  $i$  and  $n$  is the maximum number of zones. The definition of the risk index  $I_k$  is estimated on the surface repartition of geomorphological features with the evaluation of the maximum risk coefficient  $R_{max}$  in relation with six numbers  $R_{max} = S_{tr} \times 6$ . The risk coefficient  $R$  ranges from 4.7 to 72.9 and the risk index  $I_k$  ranges from 26.1% to 53.7%. This kind of evaluation is very sensitive to problematic sites where a special investigation is necessary with complementary geophysical and geotechnical data.

The field readings, statistically analyzed, led to a synthetic mapping of the karstic hazards. A multivariate statistical analysis shows a different time activation on the field of observed dolines. Two different cases of dolines have been observed: active (112) or passive (55). By means of a statistical analysis a time-dependent behaviour of dolines could be observed. The hypothesis is double: a modification of the transport of clays away from fissures or a change of hydrological and morphological conditions. The depth of active dolines is a good factor and is well linked with diameter. This fact is not noted for the passive dolines. Another statistical treatment by the multivariate discrimination (Mahalanobis) method shows the same behaviour. Karstic phenomena are generally visible on the Ognon river fault system across the Triassic and Jurassic limestones with sometimes some dissolution disorder inside anhydritic marls.

**KEYWORDS:** karstic risks, hazard mapping, multivariate analysis, geomorphology.

**RESUME.** Investigations et cartographie des aléas karstiques dans une zone tectonisée complexe des Avant-Monts du Jura Nord-Occidental (France). Dans le secteur Nord-Ouest du massif jurassien le passage du futur TGV a nécessité la définition d'une méthode de détermination des aléas karstiques. La zone géographique, d'une longueur de 140 km et d'une largeur moyenne kilométrique, s'étend entre les vallées de la Saône à l'Ouest et de la Savoureuse à l'Est. Le secteur traversé comporte des accidents chevauchants et transversaux affectant les formations calcaires karstifiées datées du Trias au Jurassique supérieur. De nombreuses formes de dissolution répertoriées ont été associées à des circulations d'eau (110 sources, 206 dolines, 6 grottes et 21 pertes d'eau). Les relevés de terrain, traités statistiquement, ont conduit à une cartographie synthétique des aléas karstiques. Nous détaillons la méthode cartographique qui nécessite la détermination de trois indices : géomorphologique, de la taille des dolines et de la profondeur des dolines. La carte synthétique finale permet de localiser les zones, avec un nombre à trois chiffres, où le risque karstique peut poser problème sur le plan géotechnique et hydrologique. Une analyse statistique multi-variable indique une

différence de fonctionnement au cours du temps des dolines comptabilisées sur le terrain en mettant en évidence une évolution de leur activité par l'intermédiaire du rapport entre leur diamètre et leur profondeur.

**MOTS-CLES :** aléas karstiques , cartographie de zones à risque , statistiques , géomorphologie.

## 1. Introduction

Les terrains carbonatés constituent en raison des vides créés par le phénomène de karstification des secteurs préjudiciables aux tracés d'infrastructures linéaires tels que les nouvelles voies ferrées ou les autoroutes . Outre l'effondrement des voûtes minces ou broyées , les zones karstiques peuvent subir une évolution géomorphologique actuelle , éventuellement réactivée par une modification de l'écoulement des eaux apportée par le tracé lui-même (reprise d'érosion) . Dans notre cas compte - tenu de la spécificité géomorphologique et géotechnique du milieu une méthodologie adaptée à ce milieu particulier a été définie . Son objectif est une cartographie des facteurs de risque fondée sur un recensement d'indices de terrain hiérarchisés pour l'élaboration d'une grille de critères dont la pertinence a été testée.

La cartographie géotechnique , depuis plus de 25 ans (Sanejouand,1972), introduit l'analyse de différents facteurs géotechniques . L'analyse des risques naturels liés aux mouvements de terrain est très courante et aboutit à la réalisation d'une carte des degrés du risque d'instabilité basée sur plusieurs paramètres parmi lesquels la nature

lithologique et géotechnique des formations géologiques (Fares,1994) . Dans le domaine qualitatif l'examen de la vulnérabilité du milieu karstique a fait l'objet récemment de nombreux travaux en particulier au niveau de la protection des eaux souterraines (Vrba *et al.*,1994; Doerfliger,1996; Doerfliger *et al.*,1997; Tripet *et al.*, 1997) dans un but cartographique et thématique intéressant soit les chercheurs soit les aménageurs . Dans notre cas la démarche est similaire car nous désirons répondre aux répercussions sur le milieu naturel , en termes hydrogéotechniques , du futur tracé de chemin de fer du TGV Rhin-Rhône . Il est important d'étudier le réseau karstique et les circulations d'eau souterraine en dressant un inventaire détaillé et une cartographie de tous les éléments témoignant de l'existence d'une activité karstique (Tab. 1). Cette première étape de terrain a été suivie d'une analyse multicritère appliquée aux indices de terrain permettant ainsi de définir des facteurs de karstification puis d'établir une grille plausible des aléas potentiels vis à vis de l'infrastructure projetée. Cette étape s'est traduite par l'élaboration d'une carte des facteurs de risque sur la zone aval de la vallée de l'Ognon puis sur l'interfluve Ognon et vallée du Doubs (Fig. 1) .

	DIST KM	DOL A	DOL E	DOL EX	GROT	PERT	GOUF
PO	14	1	1	1	0	3	0
PE	14	13	0	0	2	6	0
GY	12,5	7	3	7	1	0	2
BO	14	14	7	0	0	2	0
BE	8	10	1	0	1	4	0
VS	4,5	0	0	0	0	0	0
BAO	15,5	32	17	0	1	1	0
BAE	10,5	1	6	0	1	0	0
LO	13,5	1	0	1	1	3	0
LE	14,5	12	23	12	0	4	2
BF	1,5	1	0	0	0	0	0
TOT	122,5	92	58	21	7	23	4

Légende :

DOL A : doline active

DOL E : doline empatée

DOL EX : doline exploitée

GROT : grotte

Legend :

Active doline

Clogged doline

Exploited doline

Cave

BF : Belfort

PO : Pesmes Ouest

PE : Pesmes Est

GY : Gy

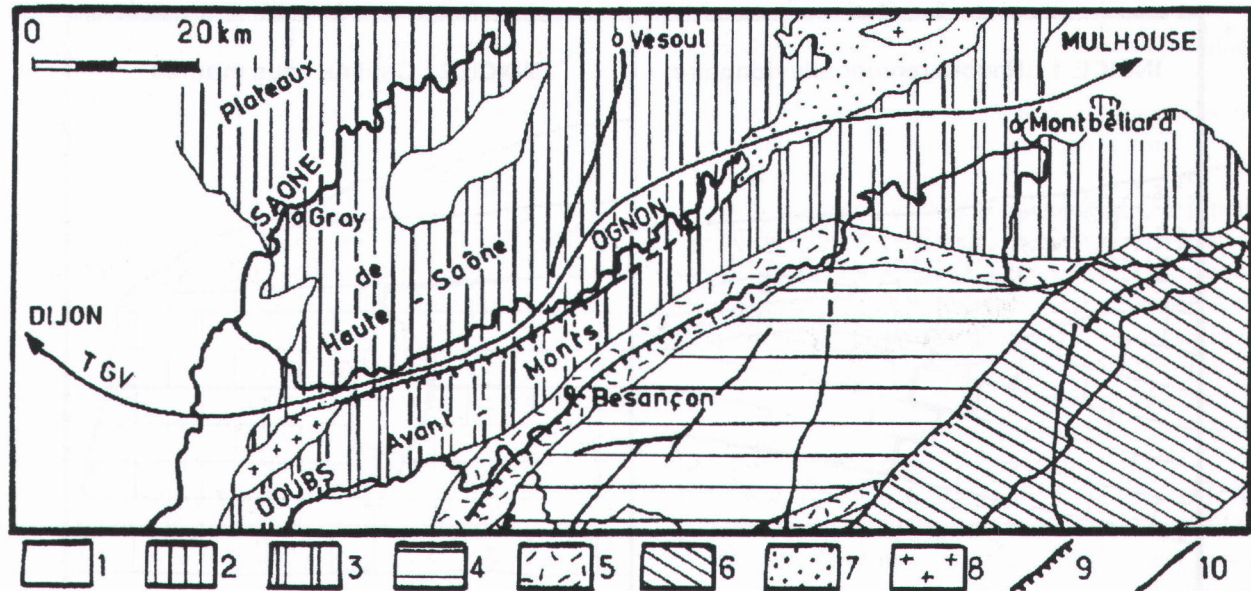
BO : Besançon Ouest

**Tableau 1.** Répertoire des phénomènes karstiques rencontrés sur le profil Rhin-Rhône

Légende : les distances (DIST KM) sont des longueurs de tronçon de la voie ferrée future.

**Table 1.** Directory of karstic phenomenons met on the Rhine-Rhone transect.

Legend : the distances (DIST KM) are the length of the future railway sections.



**Figure 1.** Situation du tracé linéaire du futur Train à grande vitesse (TGV) Rhin-Rhône traversant les formations calcaires  
 Légende : 1 : dépressions tertiaires et quaternaires. 2 : plateaux. 3 : avant-monts. 4 : plateaux du Jura externe. 5 : faisceaux plissés. 6 : haute chaîne. 7 : dépressions triasiques. 8 : massifs cristallins. 9 : chevauchements. 10 : failles.

**Figure 1.** Position of the future high speed train line Rhine-Rhone across the limestone formations

Legend : 1 : Tertiary and Quaternary depressions. 2 : plateau. 3 : fore-mountain belt. 4 : external platform of the Jura. 5 : fold bundles. 6 : high chain. 7 : Triassic depression. 8 : crystalline massifs. 9 : thrust faults. 10 : faults.

## 2. Cadre géologique et structural

Le Jura se présente sous la forme d'un arc à convexité tournée vers le NW où alternent zones tabulaires et zones plissées à l'avant de la courbure alpine. Les zones des Avant-Monts jurassiens s'étendant de la dépression bressane jusqu'à la bordure du fossé rhénan viennent au contact des plateaux de Haute-Saône.

L'accident décrochant de la vallée de l'Ognon fait légèrement chevaucher les Avant-Monts sur la zone des plateaux. De direction SW-NE, dite varisque, cet accident provient de la réactivation de structures hercyniennes.

Des failles sub-méridiennes, liées aux dislocations des fossés rhénan et bressan, affectent également les séries triasiques et jurassiques et viennent buter sur l'accident NE de l'Ognon (Chauve *et al.*, 1980; Chauve *et al.*, 1994). Les formations karstiques sont comprises entre le Trias et le Jurassique supérieur. Elles sont constituées par les dolomies du Trias, les calcaires à Gryphées du Lias, les calcaires oolithiques, les calcaires bio-clastiques et récifaux, les calcaires sub-lithographiques du Jurassique moyen et supérieur. Toutes ces formations recouvrent ou sont surmontées par des marnes.

## 3. Objets recensés pour la cartographie

Sur le terrain puis sur les photographies aériennes toutes les formes exo-karstiques sont cartographiées : sour-

ces, pertes, dolines, grottes, failles. Deux catégories de dolines sont distinguées : les formes colmatées (ou empâtées) recouvertes par des dépôts résiduels argileux et ne montrant aucune trace d'activité actuelle et les formes actives. Sont considérées comme actives les dolines dans lesquelles les arbres sont inclinés ou courbés, ce qui traduit une mobilité récente du sol, ainsi que celles dans lesquelles la suffosion évacue des formations meubles de surface. De telles dolines montrent des effondrements actuels permettant le drainage des eaux vers la profondeur.

Les points d'eau et les retenues de surface ont été également représentés. Puis quatre jeux de carte sont élaborés à l'échelle du 1/25000 sur onze feuilles avec les relevés suivants :

- de zonation géomorphologique;
- de zonation indiquant la taille (diamètre) des cavités reconnues;
- de zonation indiquant la profondeur (ou hauteur) des cavités reconnues;
- de superposition des indices géomorphologiques, de taille et de profondeur.

La carte d'indices géomorphologiques (Fig. 3A) distingue les zones suivantes:

- les alluvions anciennes et récentes. Ce paramétrage s'appuie sur une mobilité actuelle croissante. Cette vision n'est pertinente qu'à l'instant présent. Cette cartographie basée sur une stabilité apparente aujourd'hui est cependant évolutive. L'existence d'al-

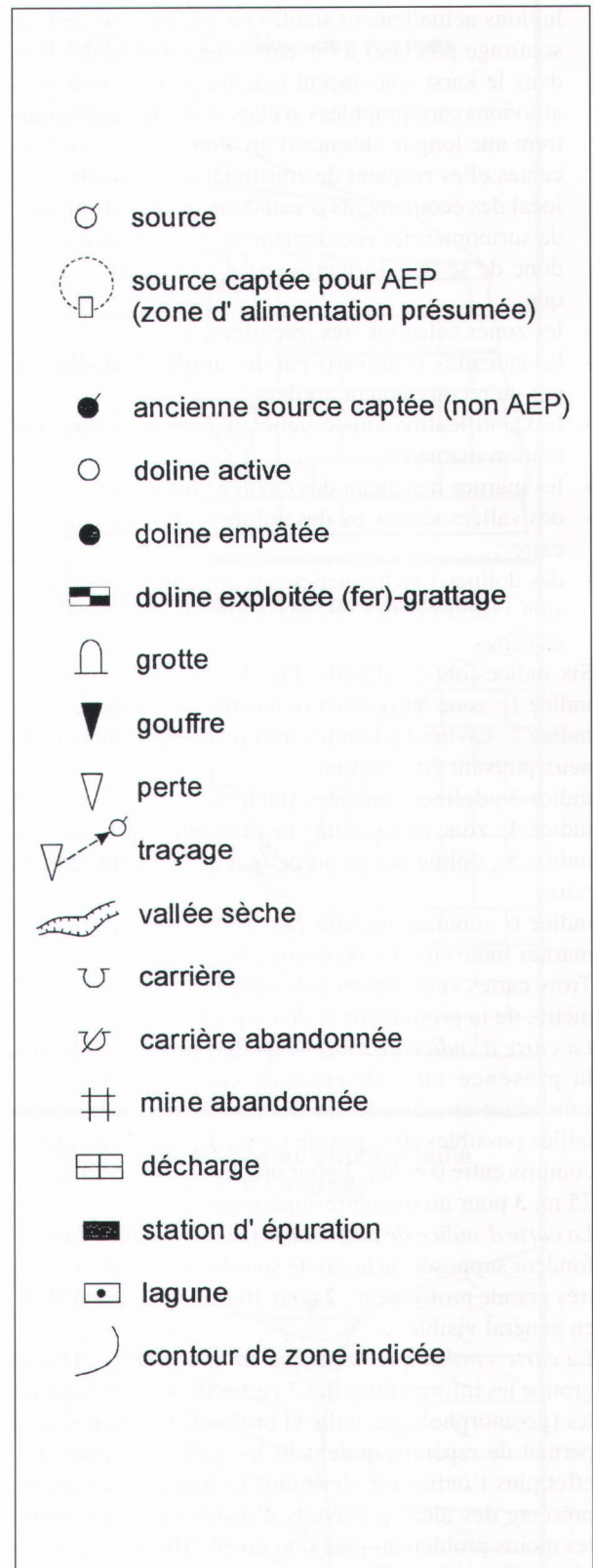
Une validation statistique de l'aléa karstique, réalisée sur les informations disponibles sur le terrain, a conduit au traitement de toutes les informations pertinentes par les outils de l'analyse par composantes principales et par une analyse par les fonctions discriminantes (Davis, 1986; Wacogne & Mania, 1996). Nous avons pu montrer que la première méthode conforte la bonne adéquation entre l'indice karstique et les variables dolines/pertes. La deuxième méthode permet de mieux comprendre l'évolution spatiale des dolines en tenant compte de leur diamètre et de leur hauteur. La deuxième méthode permet de mieux comprendre l'évolution spatiale des dolines en tenant compte de leur diamètre et de leur hauteur. La discrimination dans un espace multivarié a été testée en faisant appel à l'hypothèse de Mahalanobis qui nécessite le calcul d'une matrice variances-covariances des deux variables croisées diamètre et hauteur pour les 2 groupes de dolines (actives et colmatées). L'évaluation des scores statistiques permet d'établir une discrimination plus forte pour la variable hauteur de dolines que pour la variable diamètre donc de séparer les deux groupes de dolines.

Une différence significative est notée entre les deux moyennes multivariées respectivement de 0.819 pour le groupe des dolines actives et de 0.620 pour les dolines empâtées. Ceci est confirmé indirectement par des coefficients de corrélation linéaire respectifs de 0.74 et de 0.20 (Fig. 6). Les dolines les plus actives ont été notées sur les feuilles de Pesmes, de Besançon et de Baume les Dames.

Nous notons que les phénomènes karstiques liés à l'accident de l'Ognon se développent essentiellement dans les calcaires du Bajocien (J1), du Bathonien (J2), du Rauracien (J6), du Séquanien (J7) et du Kimméridgien (J8). Les calcaires dolomitiques du Trias (T5-6) peuvent provoquer quelques désordres ainsi que les marnes à anhydrite (T7-8).

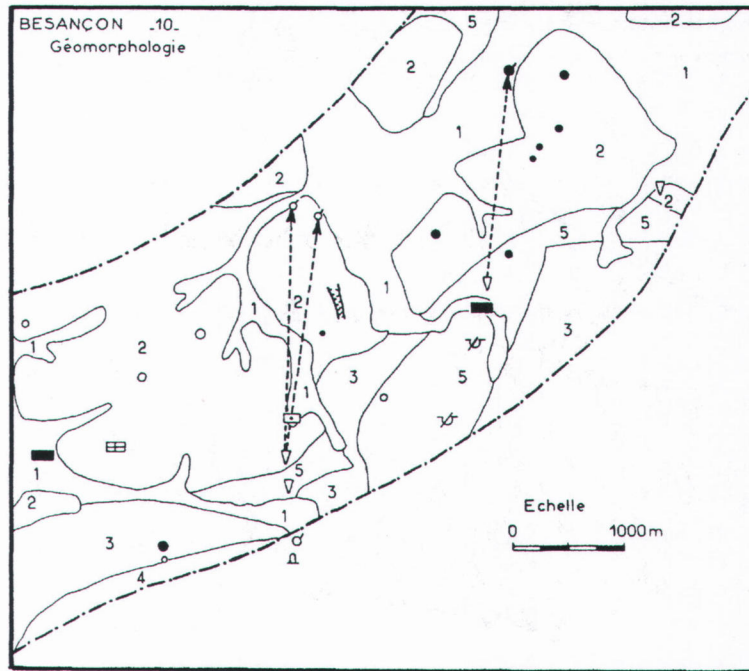
## 6. Interprétation d'un secteur à risques : la feuille de Besançon Est (N°10 - R= 52.9 et $I_k = 38.33$ )

Nous interprétons à titre d'exemple le secteur de Besançon (Fig. 3) où des formations alluviales récentes et anciennes viennent au contact des calcaires du Jurassique moyen en bordure sud de la vallée de l'Ognon. La karstification est localisée dans une bande longeant la bordure sud du fuseau. Les traçages ont mis en évidence des circulations rapides dans les calcaires sous recouvrement alluvionnaire. Peu de sources mais quelques pertes sont signalées (Cayenne). Les zones à risque karstique 501 et 513 sont liées aux dolines actives et aux pertes. Les travaux géologiques complémentaires concerneront en outre les zones indicées 213, 212, 113, 112 pour localiser les cavités sous recouvrement alluvionnaire ou marneux.



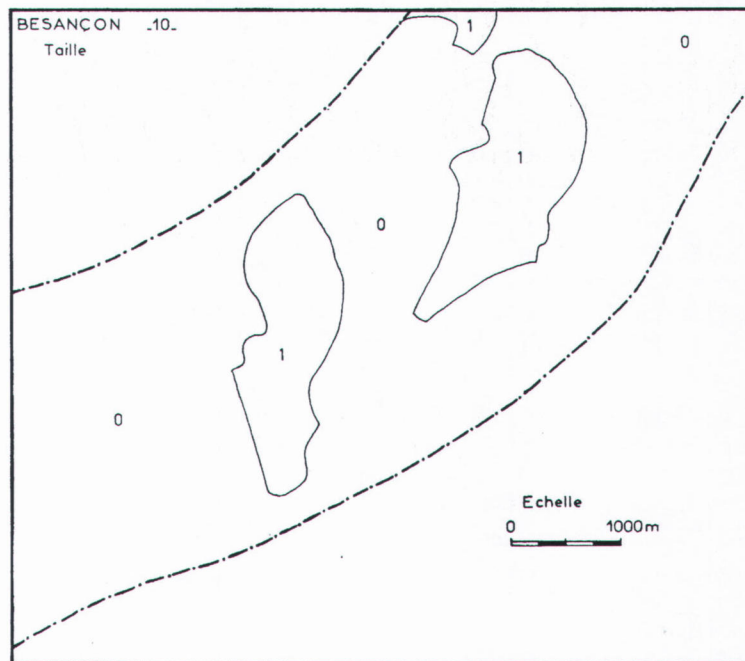
**Figure 3.** Exemple de carte de synthèse basée sur une zonéographie chiffrée (de 1 à 6) dans les formations calcaires de la région de Besançon. Légende.

**Figure 3.** Example of synthetic map with zoneographical boundaries classified with a number (from 1 to 6) across the limestones formations of Besançon county. Legend.



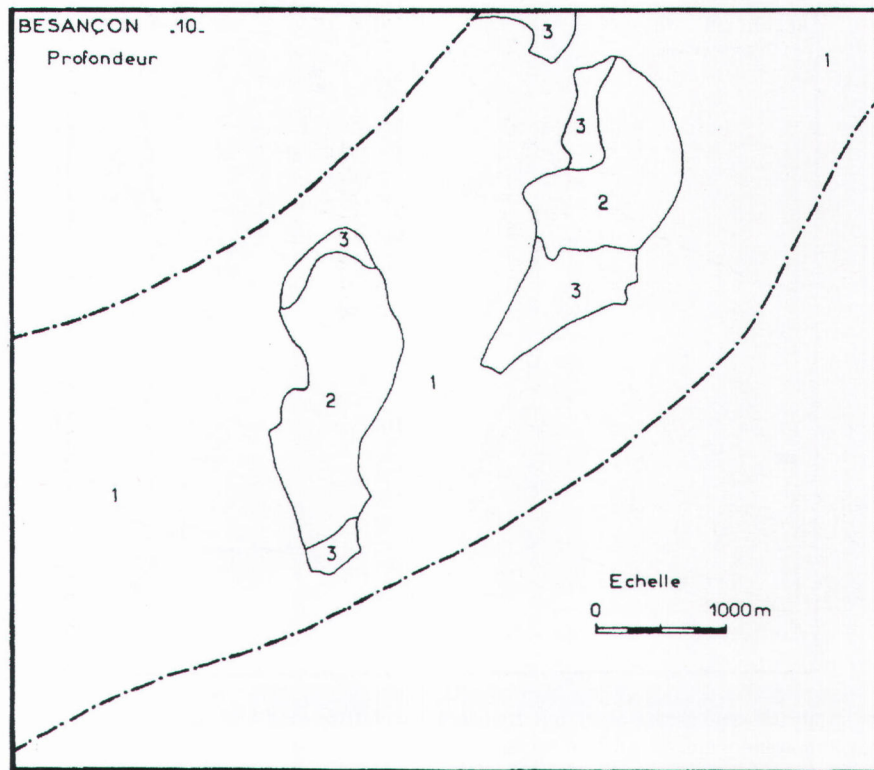
**Figure 3 A.** Exemple de carte de synthèse basée sur une zonéographie chiffrée (de 1 à 6) dans les formations calcaires de la région de Besançon. Indices géomorphologiques - indice 1 :recouvrement alluvionnaire, indice 2 : cavités sous marnes, indice 3 : doline colmatée stable, indice 4 : calcaire nu très fracturé, indice 5 : doline active ou perte, indice 6 : pertes au contact faillé calcaires/marnes.

**Figure 3 A.** Example of synthetic map with zoneographical boundaries classified with a number (from 1 to 6) across the limestones formations of Besançon county. geomorphological index .- index 1 : alluvial cover, index 2 : holes under marl cover, index 3 : stable clogged doline, index 4 : fissured naked limestones, index 5 : active doline or swallow hole, index 6 : swallow hole on faulted contact between limestones and marls.

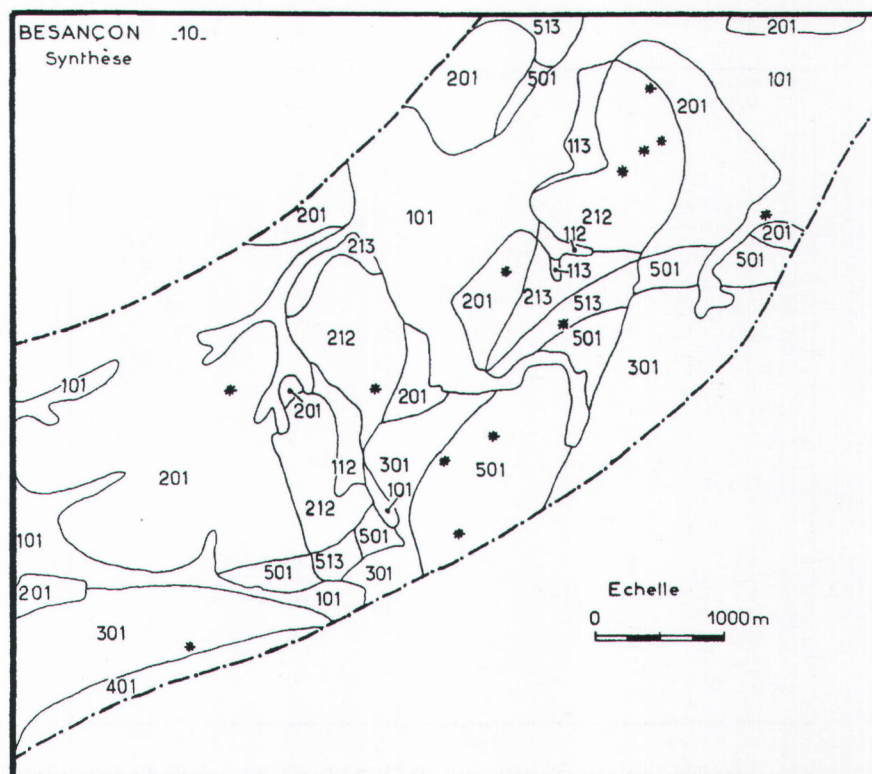


**Figure 3 B.** Taille des dolines . Légende : 0:si pas de cavité,1:diamètre entre 0 et 5m, 2:diamètre moyen de 5 à 25 m, 3:diamètre supérieur à 25 m.

**Figure 3 B.** Size of dolines . Legend: 0: no cavity,,1: diameter between 0 and 5 m,2 : diameter between 5 and 25 m 3: diameter upper than 25 m.



**Figure 3 C.** Profondeur des dolines . Légende: 1: à très grande profondeur, 2: pour 10 à 30 m, 3: de 0 à 10 m en général visible.  
**Figure 3 C.** Depth of dolines . Legend: 1: probable low possibility or great depth, 2: between 10 and 30 m, 3: visible between 0 and 10 m.



**Figure 3 D.** Synthèse générale de la carte des risques . Légende: 1: géomorphologie, 2: taille, 3: profondeur, \* perte ou gouffre.  
**Figure 3 D.** General synthesis of the risk map . Legend : 1: geomorphology, 2: size, 3: depth, \* swallow hole or vertical shaft.

N°	PLANCHE PLATE	SUPERFICIE SURFACE	Indice zonal						Zonal index				
			1	2	3	4	5	6	R	Stf	Ik	Ik%	
1	PEO III	23	8,1	29,6	0	0	0	0,5	0	38,2	138	0,28	27,7
2	PEO IV	24	2,5	37,8	7,2	0	1	0	48,5	144	0,34	33,7	
3	PEE I	3	1,4	3	0,3	0	0	0	4,7	18	0,26	26,1	
4	PEE III	20	1,1	22,8	9,6	0	19,5	2,4	55,4	120	0,46	46,2	
5	PEE II	14	7,3	9,8	3,9	0	2,5	0	23,5	84	0,28	28	
6	PEE IV	10	0,5	0,9	24,9	0	3,75	0	30,05	60	0,5	50,1	
9	GYE III	6,2	1	3,2	3,6	0	11	1,2	20	37,2	0,54	53,8	
11,1	GY II et V	32,5	3	12	64,8	0	6	4,2	90	195	0,46	46,2	
7	BEO II	22	4,2	24,2	8,1	0	15	0	51,5	132	0,39	39	
8	BEO I	21	4,8	28,4	0	0	10	0	43,2	126	0,34	34,3	
10	BEE I et II	23	5,5	23,4	8,1	2,4	13,5	0	52,9	138	0,38	38,3	
13,2	VEE III et IV	14	3,75	20,5	0	0	0	0	24,25	84	0,29	28,9	
14	BAO I	18,1	3,1	12	24	0	5	0	44,1	108,6	0,41	40,6	
15	BAO III	7,7	1,2	13	0	0	0	0	14,2	46,2	0,31	30,7	
16	BAO II	24,8	1,4	8,2	49,8	0	13,5	0	72,9	148,8	0,49	49	
18	BAE II	3,5	0	3	3	0	5	0	11	21	0,52	52,4	
20	BAE I	3,5	0	3	3	0	5	0	11	21	0,52	52,4	
21	LUO III	22,5	3,5	32	3	0	10	0	48,5	135	0,36	35,9	
22	LUO IV	22,5	6	20	0	0	32,5	0	58,5	135	0,43	43,3	
23	LUE III	21	1,5	10	40,5	0	5	0	57	126	0,45	45,2	
24	LUE IV	23	2,5	9	33	0	22,5	3	70	138	0,51	50,7	
25	BFO III	4,75	0,75	0	12	0	0	0	12,75	28,5	0,45	44,7	

Légende :

Coefficient de risque zonal :  $R = S1.a1 + \dots + S6.a6$

Superficie totale du fuseau de la planche Stf = superficie x 6

Legend :

Coefficient de risque zonal :  $R = S1.a1 + \dots + S6.a6$

Superficie totale du fuseau de la planche Stf = superficie x 6

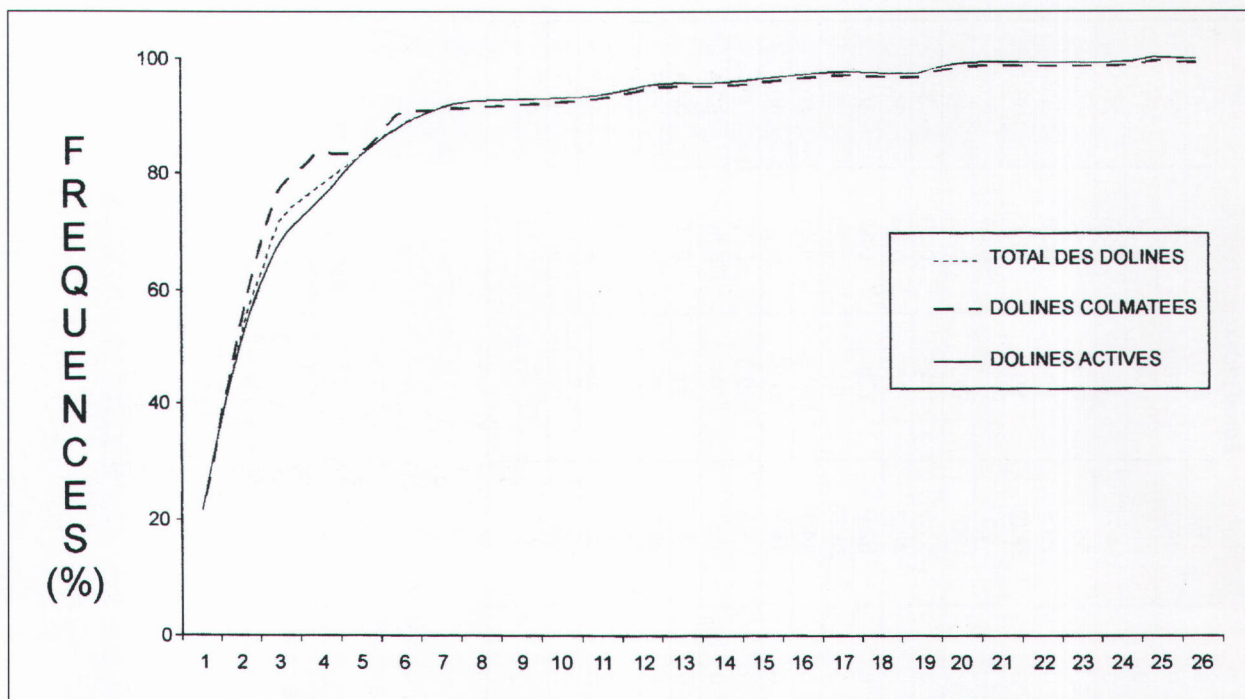
Si : surface zonale par indice géomorphologique

ai : terme pondérateur de la zone indiquée i

Si : zonal surface by geomorphological index

ai : ponderable term of the indexed zone i

**Tableau 2.** Répartition et décomposition des calculs du coefficient de risque zonal R et de l'indice karstique  $I_k$ .  
**Table 2.** Repartition and details on the computed zoneographical risk coefficient R and on the karstic index  $I_k$ .

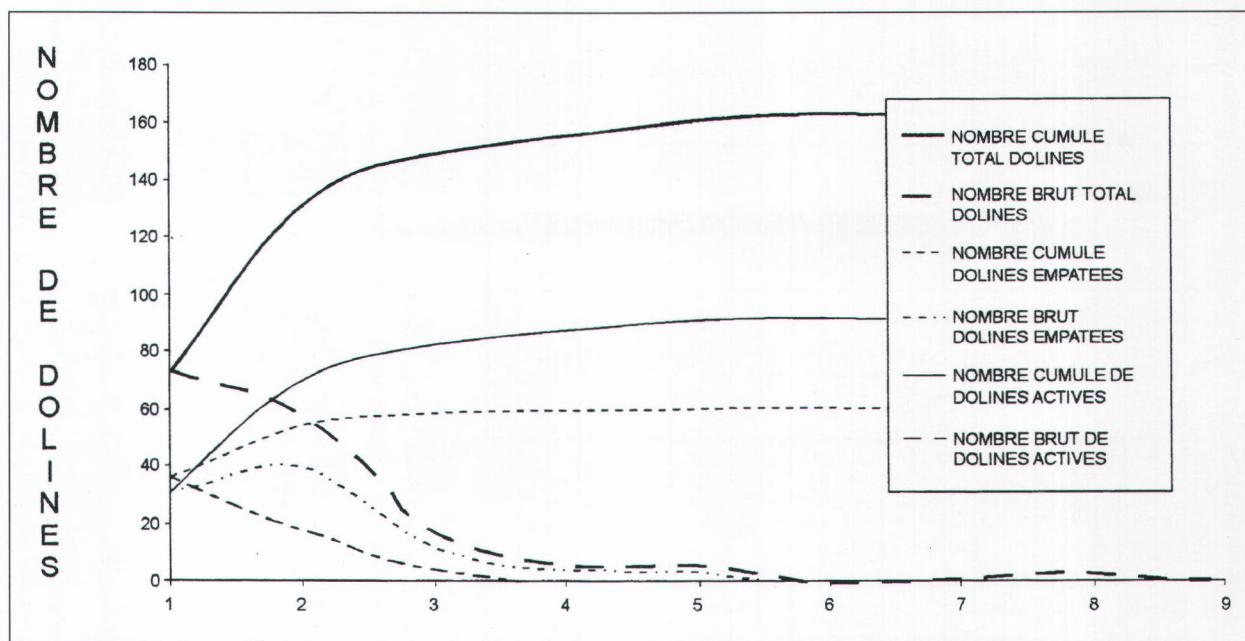


**Figure 4.** Distribution statistique des diamètres de dolines actives et colmatées.

Axe horizontal: Distribution par classes de diamètre (x 10 m).

**Figure 4.** Statistical distribution of the diameter active or choked dolines.

Horizontal axis: Distribution of classes of diameter (x 10 m).



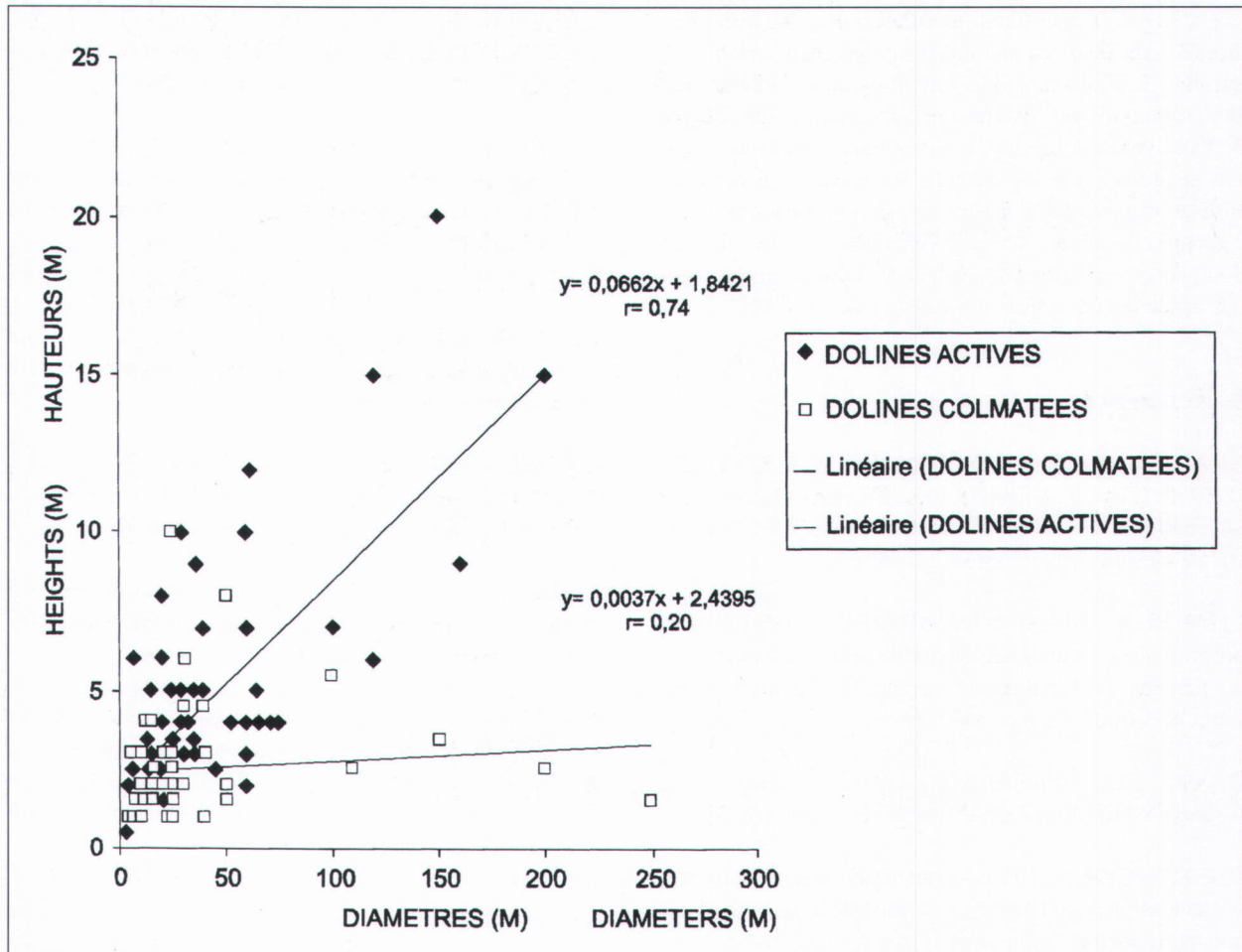
**Figure 5.** Distribution statistique des hauteurs de dolines actives et colmatées.

Axe horizontal: Classes de hauteur (intervalle de 2 m).

**Figure 5.** Statistical distribution of the height of active or choked dolines.

Horizontal axis: Height classes (2 m steps).





**Figure 6.** Comparaison des hauteurs et des diamètres de dolines actives et des dolines colmatées . Les coefficients de corrélation linéaire sont de 0,736 pour les dolines actives et de 0,20 pour les dolines colmatées.

**Figure 6.** Comparison of the heights and diameters for active or choked fossil dolines . The linear correlation coefficient is near 0.736 for active dolines and about 0.2 for choked dolines.

## 7. Conclusions

Le fuseau géographique analysé traverse diverses zones morphologiques et structurales :

Dans les zones déprimées de la vallée de l'Ognon et de la dépression périvosgienne les formes karstiques affectent des bancs carbonatés peu épais (dolomie moellon, calcaire coquillier, calcaire à gryphées). Parfois les calcaires sont masqués par des alluvions épaisses et les cavités ne sont plus détectables.

Dans les zones calcaires la karstification affecte les zones tectoniquement broyées au voisinage des accidents avec des cavités de grande taille.

Un répertoire synthétique (Tab. 1) a permis de mieux se rendre compte des problèmes que peut rencontrer de manière globale le tracé linéaire projeté avec en moyenne deux formes karstiques au kilomètre. Les investigations complémentaires dépendent étroitement des phénomènes karstiques observés sur le terrain.

La définition des facteurs de risque basés sur les paramètres géomorphologiques, de taille et de profondeur, con-

duit à la réalisation d'une cartographie synthétique dont la zonéographie est basée sur un code à 3 chiffres dont l'accroissement souligne les aléas karstiques de déstabilisation du profil de la voie ferrée. Le fuseau géographique traverse diverses zones morphologiques et structurales. Dans les zones déprimées (vallée de l'Ognon, la dépression triasique périvosgienne, les marnes liasiques) les aléas sont soit peu apparents car masqués par des alluvions épaisses (indice géomorphologique 1 ou 2) soit localisés dans certains bancs carbonatés peu épais (dolomie moellon, calcaire coquillier et calcaires à *Gryphea*). Dans ce cas la karstification peut être active (indice géomorphologique 3 ou 5). Dans les zones calcaires épaisses les aléas peuvent être liés soit à la tectonisation intense ayant broyé la roche au voisinage des accidents (indice géomorphologique 5 ou 6), soit à la morphologie exokarstique (dolines principalement : indice 3 ou 5), soit à la présence connue ou potentielle de cavités de grande taille (indice 5), soit enfin à l'activité actuelle du karst avec des soutirages de matériaux de remplissage (argile rouge, argile à chailles) ou de couverture (marnes oxfordo-argoviennes) risquant de réac-

tiver certains formes karstiques anciennes stabilisées (indices 3) avec des perturbations des écoulements d'eau souterraine. L'outil statistique a montré que les dolines actives présentent une relation diamètre/hauteur témoignant de leur évolution récente. L'analyse discriminante a permis de prouver que les variables hauteur et diamètre sont suffisantes pour dissocier le mode de fonctionnement des 2 groupes de dolines actives et empâtées. Cette constatation peut être utilisée en pratique sur le terrain pour repérer rapidement les sites en cours de karstification.

## 8. Références

- CHAUVE, O., ENAY, R., FLUCK, P. & SITTNER, C., 1980. L'Est de la France, 26ème Congrès Géologique International, Paris, *Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, Géologie*, 4, 1: 3-80 p.
- CHAUVE, P., MANIA, J. & MUDRY, J., 1994. Etudes préliminaires. Incidence et problématique du karst sur les fuseaux TGV. Rapport interne 07/94, Université de Franche-Comté, 22 p., 16 annexes
- DAVIS, J.C., 1986. *Statistics and data analysis in Geology*. 2d Editions John Wiley & Sons, New York, 646 p.
- DOERFLIGER, N., 1996. Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multi-attribute vulnerability mapping (EPIK method). Thèse Université de Neuchâtel, 301 pp.
- DOERFLIGER, N., ZWALHEN, F., MEYLAN, B., TRIPET, J.P. & WILBERGER, A., 1997. Vulnérabilité des captages en milieu karstique, G.W.A, Zurich, 5/97: 295-302.
- FARES, A., ROLLET, M. & BROQUET, P., 1994. Méthodologie de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain (région de Taounate - Rif, Nord du Maroc). *Revue Française de Géotechnique*, Paris, 69, 4: 63-72.
- SANEJOUAND, R., 1972. La cartographie géotechnique en France. Editions des Laboratoires Centraux des Ponts et Chaussées & Armines, 96 p.
- TRIPET, J.P., DOERFLIGER, N. & ZWALHEN, F., 1997. Vulnerability mapping in karst areas and its uses in Switzerland. Orléans, *Hydrogéologie*, 3: 51-57.
- VRBA, J. & ZAPOROZEC, A., 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrology, 16: 131 pp., Hannover.
- WACOGNE, R. & J.MANIA, J., 1996. Phase APS du fuseau TGV Rhin-Rhône de délimitations des zones à aléas karstiques entre les vallées de la Saône et la vallée de la Savoureuse. Rapport interne 09/96, Université de Franche-Comté, 62 p., 6 annexes

Manuscrit reçu le 31 mars 1998 et accepté pour publication le 01 décembre 1998.

## COMPTES RENDUS D'OUVRAGES - BOOK REVIEWS - BOEKBESPREKINGEN

Brian J. MITCHELL & Barbara ROMANOWICS, eds. 1999. **Q of the Earth : Global, Regional, and Laboratory Studies. Part I, Part II.** Reprint from *PAGEOPH Topical Volume 153, Nos 2/3/4*. Birkhäuser, Basel. Part I. 239 p. softcover ISBN 3-7643-6049-6. Prix sFr 48.- Part II. 504 p. softcover ISBN 0-8176-6049-6. Prix sFr 68.-

Cet ouvrage s'inscrit dans le cadre de la contribution de la sismologie à notre connaissance de la structure interne de la Terre. Il présente des nouvelles informations sur le facteur de qualité Q (ou son inverse qui est l'atténuation) dans la Terre en abordant plusieurs thèmes : méthodologies, résultats issus des observations régionales et globales des ondes de volume et de surface, des mesures de laboratoires, et des connaissances théoriques. Ces informations sont groupées sous forme d'articles en deux parties. Chaque article aborde un problème spécifique.

La partie I de ce volume met en relief les études globales et mantelliques du facteur de qualité Q. Elle reprend les articles traitant le modèle de dislocation pour l'atténuation des ondes sismiques, l'état de la tomographie globale de Q, les résultats théoriques et expérimentaux de l'atténuation (imagerie de l'anélasticité à l'intérieur de la Terre) issues de l'utilisation des ondes de volume aux distances télé-sismiques.

La partie II de ce volume regroupe les études crustales du facteur de qualité Q dans une gamme variée d'échelle et de distance. Elle reprend des articles qui traitent des études de laboratoire des roches crustales, les ondes de surface, les ondes coda-Lg, les ondes de volume à l'échelle régionale, levés de la sismique réfraction et réflexion, et les expériences de forage.

Les études expérimentales du facteur de qualité présentées dans ce volume ont été faites dans différentes régions du monde et concernent des contextes géologiques différents. Ceci offre la possibilité d'établir la corrélation entre les résultats du facteur de qualité Q et la géologie de chaque région et à fortiori d'étudier le mode d'atténuation des ondes sismique dans les différents contextes géologiques. Ces résultats apportent également des informations complémentaires à celles des vitesses sismiques sur les hétérogénéités et les grandes structures terrestres.

La diversité d'articles de la synthèse présentée dans ce volume illustre bien la richesse des pistes qui peuvent être explorées, d'un point de vue théorique et expérimental, dans le domaine de l'atténuation des ondes sismiques. Cette synthèse constitue donc une très bonne référence pour le lecteur concerné par ces problèmes.

Abdelhali EL BOUCH  
Observatoire Royal de Belgique

J. SAUBER and R. DMOWSKA, eds. 1999. **Seismogenic and Tsunamigenic Processes in Shallow Subduction Zones.**

Reprint from *PAGEOPH Topical Volume 154, No 3/4*. Birkhäuser, Basel. 380 p. softcover. ISBN 3-7643-6146-8. Prix sFr 58.-

Cet livre reprend différents articles consacrés aux séismes superficiels en zone de subduction qui sont parfois accompagnés de tsunamis dévastateurs. Cet ouvrage s'intéresse tout particulièrement aux mécanismes aux foyers (profondeur, vitesse de rupture, extension spatiale, obliquité et azimuth du plan de faille) et au rôle joué par les aspérités dans le plan de faille.

Des articles sont consacrés aux différentes causes de tsunamis, ainsi qu'à leurs effets. En particulier, on trouvera une étude géologique, ainsi qu'un compte rendu d'une étude de terrain des dégâts causés par un tsunami qui a frappé le Pérou en 1996. Une autre étude montre la difficulté de déduire un mécanisme au foyer sur base des seuls enregistrements de tsunamis.

On trouvera également différents travaux sur les mécanismes au foyer dans la région de l'Alaska et des îles Aléoutiennes, qui sont des zones de subduction typiques pour la génération de tsunamis. Ainsi, on explique comment l'inversion d'enregistrements de jauges de marée permet de contraindre le mécanisme au foyer du séisme du Kamchatka de 1952, qui est le troisième plus grand séisme s'étant produit au XXème siècle. Cet article étudie également le rôle des aspérités qui semblent contrôler la distribution des grands tremblements de Terre dans cette zone. Deux autres articles sont consacrés au second plus grand séisme du siècle dernier, à savoir celui d'Alaska de 1964. La première fait appel à des profils sismiques et des données bathymétriques pour évaluer l'influence de la topographie des plaques sur leur couplage et la quantité de sédiments entraînés le long du glissement. La seconde étudie la sismicité de la région depuis le tremblement de Terre de 1964.

On trouvera ensuite différentes discussions sur les mécanismes au foyer des séismes du Pérou (1996), du Chili (1995), ainsi que sur la séismotectonique de la plaque Nazca en subduction sous la plaque Sud-Américaine, entre autres via l'inversion des sismogrammes du séisme du Pérou de 1996. Il y a également une discussion de 220 séismes historiques et récents en Irian Jaya (Indonésie).

Enfin, un article traite des mesures par GPS des déformations coséismique et interséismique dans les Andes.

Michel VAN CAMP  
Observatoire Royal de Belgique

L. TURRIN-FERNHOLZ, S. MORGENTHALER & W. STAHEL, ed. 2001. **Statistics in Genetics and in the Environmental Sciences**. *Birkhäuser Verlag, Basel*, xiv + 183 p. hardcover, ISBN 3-7643-6575-7. Price sFr 98.

Dit volume bevat 12 van de lezingen die werden gehouden op de *Workshop on Statistics and the Sciences*, en die plaats greep in het Centro Stefano Franscini in Ascona, Zwitserland, van 23 tot 28 mei 1999. In zijn geheel bevat deze tekst een beperkt aantal van de vele mogelijkheden die de statistische discipline aanreikt aan wetenschappelijke onderzoeksterreinen, vooral dan in genetica en in milieuwetenschappen.

Van methodologisch standpunt uit bekeken komen de 5 theoretische bijdragen gedeeltelijk uit de multivariaatstatistiek; hier gebruiken onderzoekers meerdimensionale statistische technieken om de samenhang tussen meerdere veranderende grootheden in kaart te brengen. De andere teksten komen uit de robuuste statistiek; in deze laatste aanpak wordt gezocht naar procedures om de impact van uitbijters (outliers) te reduceren. Inhoudelijk behandelen de overblijvende 7 artikels toegepaste onderwerpen. Van deze 7 zijn er 3 die een onderwerp uit de medische sector aansnijden en dan meer bepaald uit genetica en uit carcinogenetisch onderzoek.

Enkel de 3 overblijvende toepassingsgerichte artikels verwijzen naar geowetenschappen. Eerst is er de bijdrage van L.R. Korn en D.E. Tyler over het robuust schatten van locatie- en schaalparameters in concentratiegegevens die aan de onderkant afgeknot (censored) zijn en aan de bovenkant gecontamineerd door uitbijters. De bijdrage van J. Stähelin en W.A. Stahel behandelt drie gevalstudies in atmosfeerchemie: (1) analyse van Ôs werelds meest-uitgebreide ozon tijdsreeks (Arosa), (2) uitstootfactoren in wegtunnels en (3) meting en verwerking van gegevens in verband met antropogene omgevingsuitstoot. Van een heel andere aard is de bijdrage van D. Brillinger die een stochastisch model opbouwt voor de waarschijnlijkheid dat een satelliet of ruimteschip wordt getroffen door ruimtedebris.

Jef L. TEUGELS

K.U. Leuven, Universitair Centrum voor Statistiek  
W. de Croylaan 52B, B-3001 Heverlee

Comptes rendus de l'Académie des Sciences de France. Sciences de la Terre et des Planètes. **Energies et climat**. Tome 333; Fascicule 12 (Décembre 2001) : 757-843. © *Académie des Sciences, Paris & Editions Elsevier*. ISSN 1251-8050.

Ce fascicule rassemble en un peu moins d'une centaine de pages dix articles faisant le point sur la montée des risques de toutes natures liés au changements climatiques.

Ces articles, présentés par les meilleurs spécialistes français du moment, résument les principales préoccupations

contemporaines d'ordre scientifique, social, économique et politique sur les conséquences de l'accentuation du phénomène d'effet de serre dans le cadre du développement durable et soutenable d'une société avancée. Au delà du constat scientifiques indiscutable des effets physiques présents et futurs du phénomène sur l'ensemble du globe, une large part des articles est consacrée à l'analyse des politiques énergétiques actuelles et des voies possibles de changement. L'accent est mis en particulier sur le statut et les développements à venir de l'énergie nucléaire française qui assure la plus grosse part de l'approvisionnement électrique du pays.

Comme toujours dans les comptes rendus de l'Académie des sciences, les articles sont denses mais accessibles par tout un chacun. On peut regretter cependant que certains auteurs n'aient pas jugé utile de joindre une liste de références à leur texte.

Pierre MANFROY

ONDRAF, Bruxelles

Robert DAUTRAY. 2001. **L'énergie nucléaire civile dans le cadre temporel des changements climatiques. Rapport à l'Académie des Sciences**. *Editions Tec&Doc, 11, rue Lavoisier, F-75008 Paris*. ISBN 2-7430-0534-3. 329 p.

Ce rapport, écrit par l'un des meilleurs spécialistes internationaux de l'énergie nucléaire à la demande de l'Académie Française des Sciences, vise à apporter une contribution aux réflexions que cette institution a entrepris dans le cadre plus global des changements climatiques. Il constitue une description très complète mais d'accès facile des principales préoccupations en matière de nucléaire civil, à savoir la gestion du cycle aval du combustible ainsi que les considérations sur la sûreté et la radioprotection qui y sont liées. En tant qu'outil d'information pour les membres de l'Académie des Sciences, ce texte clair, soutenu par des annexes techniques très complètes, s'étend de manière exhaustive sur l'état de la question en matière de gestion des déchets radioactifs en France. L'auteur justifie sa conviction, pas nécessairement partagée par les décideurs politiques, que l'enfouissement profond et définitif de ces déchets constitue la seule solution raisonnable. Sur la base de cette conviction, le rapport aboutit à une proposition d'action visant à mettre en oeuvre cette pratique dans les meilleurs délais au détriment d'autres options, telle que la transmutation, qui ne feraient que retarder les décisions politiques et accroître les risques de dispersion de la radioactivité. Compte tenu de la forte dépendance de la Belgique vis-à-vis du nucléaire, ce livre est riche en informations utiles pour notre pays tant pour les techniciens et politiques concernés que, plus largement, pour tout citoyen désireux être informé sur ces problèmes largement controversés.

Pierre MANFROY

ONDRAF, Bruxelles