



LA CHAUX-DE-FONDS
SWITZERLAND
10th – 17th AUGUST 1997

PROCEEDINGS OF THE 12th INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY



VOLUME 2

6th CONFERENCE ON LIMESTONE HYDROLOGY
AND FISSURED MEDIA

6^e COLLOQUE D'HYDROGÉOLOGIE EN PAYS
CALCAIRE ET EN MILIEU FISSURÉ

The Centre of Hydrogeology, University of Neuchâtel, Switzerland
The Laboratory of Structural and Applied Geology, University of Franche-Comté, Besançon, France
The Swiss Speleological Society

Proceedings of the 12th International Congress of Speleology

Volume 2

Actes du

**6^e Colloque d'Hydrologie
en Pays Calcaire et en Milieu Fissuré**

Proceedings of the
**6th Conference on Limestone
Hydrology and Fissured Media**

La Chaux de Fonds, Switzerland, 10 -17.08.1997

Pierre-Yves Jeannin, *editor*

**Symposium 1: 6th Conference on Limestone
Hydrology and Fissured Media**

Scientific board: Pierre Chauve
Denis Blant
Cyril Delporte
Jacky Mania
Jacques Mudry
Imre Müller
François Zwahlen

Editorial board: Sabine Robert
Gisèle Salomon
Cédric John
Jacques Péguenet

Scientific Committee:

Dr. M. Bakalowicz, Montpellier, France.	Prof. I. Müller, Neuchâtel, Switzerland.
Dr. M. Bouzelboudjen, Neuchâtel, Switzerland.	Prof. J. Mudry, Besançon, France.
Prof. W. Balderer, Zürich, Switzerland.	Prof. A.N. Palmer, Oneonta, USA.
Prof. B. Blavoux, Avignon, France.	Prof. A. Pulido-Bosch, Granada, Spain.
Prof. O. Bonacci, Split, Croatia.	Prof. J. Prestor, Ljubjana, Slovenia.
Prof. L. Bouchaou, Agadir, Morocco.	Dr. J.M. Puig, Avignon, France.
Prof. A. Burger, Neuchâtel, Switzerland.	Prof. M. Razack, Poitiers, France.
Prof. P. Chauve, Besançon, France.	Dr. B. Reichert, Karlsruhe, Germany.
Prof. W. Dreybrodt, Bremen, Germany.	Dr. Y. Rossier, Meyzieu, France.
Prof. C. Drogue, Montpellier, France.	Prof. C. Rousset, Marseille, France.
Prof. J.P. Faillat, Brest-Plouzané, France.	Dr. M. Sauter, Tübingen, Germany.
Prof. D. Ford, Hamilton, Canada.	Prof. P. Smart, Bristol, UK.
Prof. H. Hötzl, Karlsruhe, Germany.	Prof. G. Teutsch, Tübingen, Germany.
Prof. L. Kiraly, Neuchâtel, Switzerland.	Dr. F. Vuataz, Neuchâtel, Switzerland.
Prof. R. Langguth, Aachen, Germany.	Prof. W.B. White, Pennsylvania, USA.
Prof. C. Leibundgut, Freiburg, Germany.	Dr. S. Worthington, Hamilton, Canada.
Dr. A. Mangin, Moulis, France.	Prof. G.M. Zuppi, Torino, Italy.
Prof. J. Mania, Besançon, France.	Prof. F. Zwahlen, Neuchâtel, Switzerland.
Prof. B. Mijatovic, Novi Sad, Yugoslavia.	



International Union of Speleology
Union Internationale de Spéléologie
Internationale Union für Speläologie



Swiss Speleological Society (SSS)
Société Suisse de Spéléologie (SSS)
Schweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung (SGH)



United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation
Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation



International Association of Hydrogeologists (IAH)
Association Internationale des Hydrogéologues (AIH)



International Association of Hydrological Sciences (IAHS)
Association Internationale des Sciences Hydrologiques (AISH)



Swiss Academy of Sciences (SAS)
Académie Suisse des Sciences Naturelles (ASSN)
Schweizerische Akademie für Naturwissenschaften (SANW)



International Geographic Union
Union Géographique Internationale



International Association of Geomorphologists (I.A.G.)
Association Internationale des Géomorphologues (A.I.G.)

ISBN 2-88374-007-0 (Vol. 2)

ISBN 2-88374-012-7 (Vol. 1-6)

ISSN 0759-7517 (Sciences & Techniques de l'environnement)

Aknowledgements for sponsoring to:

University of Franche-Comté at Besançon
Inter-Unec, Besançon

Publisher: University of Franche-Comté, Sciences & Techniques de l'Environnement

Cover: Titanengang, Hölloch, Switzerland (Photo Ballmann/Widmer)

Sales: Bibliothèque de la Société Suisse de Spéléologie, c/o Bibliothèque de la Ville, Rue du Progrès 33, CH-2300 La Chaux-de-Fonds,
Fax: 021 947 53 78, email: ssslib@vtx.ch

Printed in Switzerland

Papers published from the camera ready copies, prepared by the authors after reviewing by the members of the scientific committee. Despite this, the scientific board wishes to make clear that it shall take no responsibility for any mistakes and omissions, or for the opinions stated by the authors.

SCIENCES & TECHNIQUES DE L'ENVIRONNEMENT, Université de Franche-Comté, mémoire hors-série n°12-1997

Table of Contents

Symposium 1 of the 12th International Congress of Speleology: 6th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media

Session 1: The effects of natural catastrophes and large scale construction on karst aquifers *Impact d'événements exceptionnels ou de grands travaux sur le comportement des aquifères karstiques*

Bayle Christian	Incidences d'une galerie réalisée à travers un massif avec karst.....	1
Emblanch Christophe, J. Mudry, R. Lastennet & J.M. Puig	Évolution du régime des écoulements karstiques liés à une impulsion pluvieuse exceptionnelle. Exemple de la source de Notre Dame des Ange (Vaucluse, France).....	5
Horat Peter A. Faeh, F. Naef, S. Scherrer & Ch. Zurbrügg	Wie grosse Hochwasser kann die Schüss bringen? Über die Entstehung extremer Hochwasser im verkarsteten Einzugsgebiet der Schüss.....	9
Jeanbourquin Pascal	Eaux souterraines et évaluation des risques liés à l'exploitation des carrières en pays karstiques.....	13
Lastennet Roland, J. Mudry & Ch. Emblanch	La structure du karst: apport par l'étude des écoulements lors de phénomènes pluvieux exceptionnels.....	17
Shenjifang Wanjunwei Y. & X.C.C. Liyanyun	The karstic collapse earthquake induced by water storage of Geheyan reservoir in the Quingjiang River, Hubei, China.....	21

Session 2: Development of measurement techniques in caves and its meaning for the study of karst. *Évolution des techniques de mesure en grotte et apport pour l'étude du fonctionnement du karst.*

Bakalowicz Michel	Hydrogéologue versus spéléologue, ou de qui relève l'étude et l'exploration des eaux souterraines karstiques?.....	23
Bonacci Ognjen	Role of speleology in karst hydrology and hydrogeology.....	27
Häuselmann Philipp & M. Otz	Wasserfärbung im Gebiet Gemmenalp - Sieben Hengste: Ziele und Resultate.....	31
Hobléa Fabien	Spéléologie, exploitation et protection des eaux souterraines dans les karsts des environs de Chambéry (Savoie - Isère, France).....	35
Le Pennec Robert	Délimitation du bassin versant karstique de la Bienne (Haut-Jura, France) par la géologie et les essais de traçage	39
Martín-Rosales W., M. López-Chicano, A. Pulido-Bosch, & A. Vallejos	Contrôle automatique de plusieurs paramètres dans la Grotte des Merveilles (Aracena, SW de l'Espagne)	43
Schnegg Pierre-André & N. Doerfliger	An inexpensive flow-through field fluorometer	47
Smart Chris C. & L. Zabo	Experimental design, technique and protocol in fluorimetric tracing of ground water	51
Meus Philippe, M. Bakalowicz, W. Käss, B. Barczewsk & G. Schmid	Perspectives offertes par la mesure en continu des traceurs fluorescents dans le karst	55

Session 3: Rock solution kinetics and speleogenesis.
Cinétique de dissolution et spéléogénèse

Borsato Andrea	Dripwater monitoring at Grotta di Ernesto (NE-Italy): a contribution to the understanding of karst hydrology and the kinetics of carbonate dissolution	57
Brouquisse François	Données hydrogéochimiques sur quelques karsts du sud-est asiatique	61
Clemens Torsten, D. Hückinghaus, M. Sauter, R. Liedl & G. Teutsch	Simulation of the evolution of maze caves	65
Destombes Jean-Luc, M. Cordonnier, J.Y. Gadat, & J.J. Delannoy	Periodic and aperiodic forcing of water flow through sodastraw stalactites (Choranche, Vercors, France)	69
Dreybrodt Wolfgang & J. Siemers	Early evolution of karst aquifers in limestone: Models on two-dimensional percolation clusters	75
Eisenlohr Laurent, B. Madry & W. Dreybrodt	Changes in the dissolution kinetics of limestone by intrinsic inhibitors adsorbing to the surface	81
Faillat Jean-Pierre	Abondance et origine des composés carbonés inorganiques des sources karstiques du Languedoc-Roussillon	85
Grasso Domenico A. & P.Y. Jeannin	Approche statistique de l'impact des variations climatiques sur la réponse chimique des sources karstiques	91
Pajón-Morejón Jesús M., A. V. de la Cruz, J. J. Valdés, A. E. García, C. M. Cruz	Geochemical and geomathematical control of the karstic waters composition of the pan de Guajaibón and surroundings, Sierra Del Rosario, Pinar Del Río, Cuba	95
Perrin Jérôme	Géologie et géochimie des eaux dans le réseau du Grand Cor (Valais-Suisse)	99
Sanchez-Moral S., J.C. Cañaveras, E. Sanz-Rubio, M. Hoyos & V. Soler	Hydrogeochemical characterization of Tito Bustillo cave (northern Spain) ...	103
Sauter Martin, R. Liedl, T. Clemens & D.Hückinghaus	Karst aquifer genesis - Modelling approaches and controlling parameters ...	107
Somlette Luc, J.P. Faillat & G. Le Bec	Influence d'intercalations carbonatées en milieu sédimentaire à dominance siliceuse sur le chimisme des eaux (Finistère, France)	111
Vanara Nathalie	Dissolution et spéléogénèse en contexte tectonique actif: Le massif des Arbailles (Pyrénées-Atlantiques, Fr.)	115
Menne Benjamin	Microbiological processes at the cave development and karstification	119
van Beynen P.E., V.A. Toth, D.C. Ford, & H.P. Schwarcz	Seasonal Fluxes of Humic Substances in Cave Drip Waters, Marengo Cave, Southern Indiana	120
Xuewen Zhu	Systematic evolution of subterranean river caves	121
Yuan Daoxian	Characteristics of hydrochemical responses to environmental change in a carbonate rock aquifer	123

Session 4: Hydraulics and mass transport in karst aquifers
Hydraulique et transport de masse
dans les aquifères karstiques

Atteia Olivier	Nature and transport of natural colloids in a karstic aquifer	125
Bundschuh Jochen	Temporal variations of spring water temperatures in relation to the extents of the heat transport modes occurring in the karstified lower Gypsum-Keuper aquifer (Karnian, southern Germany)	129
Doerfliger Nathalie	Results of a study about tracing tests transfer functions variability in karst environment	133
Guglielmi Yves, C. Mangan, J. Mudry & A. Reynaud	Evolution piézométrique et qualitative d'un aquifère carbonaté soumis à un fort pompage de longue durée: exemple du graben de Pinchinade (Mouans-Sartoux, 06)	137
Hauns Michael, F. Hermann & O. Atteia	Application of a computational fluid dynamics model to cave river hydrodynamics	141
Hückinghaus Dirk, R. Liedl & M. Sauter	Characterization of karst aquifers by heat transfer	145
Jeannin Pierre-Yves & J.C. Maréchal	Dispersion and tailing of tracer plumes in a karstic system (Milandre, JU, Switzerland)	149
Liedl Rudolf, S. Renner & M. Sauter	Obtaining information on fracture geometry from heat flow data	153
Maucha Laszlo	Special spring discharge changes in the Aggtelek karst region in Hungary ..	157
Mohrlok Ulf, J. Kienle & G. Teutsch	Parameter identification in double-continuum models applied to karst aquifers	163
Mohrlok Ulf & M. Sauter	Modelling groundwater flow in a karst terrane using discrete and double-continuum approaches - importance of spatial and temporal distribution of recharge	167
Motyka Jacek & A. Zuber	Water levels as response functions for different porous-fissured-karstic systems	171
Pascu Maria, R.D. Gaspar	Application of flow models to the prediction of karst behaviour and pollutant migration in a groundwater system	175
Plagnes Valérie	Le transport de matière dans les aquifères karstiques	179
Smart Chris C.	Modelling of suckwell recharge in carbonate terrain	183
Werner Andreas, H. Hötzl & W. Käb	The interpretation of a High Water Tracer Test in the Danube-Aach-System (western Swabian Alb, Germany)	187
White William B. & E. L. White	Storm pulses, thresholds, and fluid mechanics in the transport of clastic sediments in limestone aquifers	191
Worthington Stephen R.H. & D. C. Ford	Borehole tests for megascale channeling in carbonate aquifers	195
Zechner Eric, D. Genereux, J.D.A. Guardiaro, & J.E. Saiers	Estimation of aquifer parameters in highly permeable limestone (Biscayne Aquifer, Florida).....	199

Session 5: Vulnerability and protection of karst aquifers
Vulnérabilité et protection des aquifères karstiques

Burri Ezio, R. Massoli-Novelli & M. Petitta	Vulnerability of karstic aquifers in Abruzzi (Italy). Two different case-studies: Gran Sasso mountain and Fucino plain	201
Cimino Antonio, R. Abbate, M Macaluso & S. Orecchio	Karst hydrogeology and vulnerability in a coastal sector of Nebrodi Mts. region (Northern Sicily)	205
Doerfliger Nathalie & F. Zwhalen	EPIK, méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques pour la délimitation des zones de protection	209
Eiswirth Matthias & H. Hötzl	Contaminant transport from leaky landfills in karst areas	213
Gaspar Radu & I. Paunica	South Dobrogea karst vulnerability by assessment of some geophysical and geochemical parameters	217
Meier Edi, P.Huggenberger, W. Stiefelhagen, I. Müller, & R. Christe	Geophysical methods as a tool for speleological and geotechnical investigation in karst Maira, Plateau de Bure (JU), Switzerland	221
Melloul Abraham J. & S. Wollman	Contamination of carbonate aquifer and evidence of karst effects in Israel ...	225
Montandon Paul-Etienne, S. Gogniat, P. Rognon & J.J. Miserez	Nitrification des eaux rejetées par la STEP de La Chaux-de-Fonds -Suisse lors de leur passage dans le système karstique de la Ronde	229
Motyka Jacek & A. Postawa	Variability of Cl ⁻ ion in water inflows to karst-fissured limestone "Zakrzówek" quarry (Cracow, Poland)	235
Müller Elisabeth, K.P. Seiler & A. Hartmann	Microbiologic activities in open karst aquifers with matrix porosity and consequences for ground water protection in the Franconian Alb, Germany	239
Müller Imre & P. Turberg	"L'image" de la fracturation et de la karstification dans le Jura suisse par prospection magnétique	243

Session 6: Karst hydrogeology
Hydrogéologie du Karst

Abdesselam Malek, H. Lami, J. Mania, J. Mudry, C. Aigoun & P. Chauve	Drainage karstique de la chaîne calcaire du Djurdjura (Grande Kabylie, Algérie). Alimentation et interaction entre composantes évaporitique et carbonatée	247
Andreo B., J. Mudry, F. Carrasco & I. Vadillo	Utilisation des traceurs météoriques (Cl ⁻ , ¹⁸ O) à l'étude des aquifères carbonatés des sierras Blanca et Mijas (Cordillère Bétique, Sud de l'Espagne)	251
Benderev Aleksey & S. Shanov	Karst waters from the region of Bosnek (West Bulgaria): Characteristics and conditions of formation	255
Bodin Jacques & M. Razack	Application du concept de surface élémentaire représentative (S.E.R.) à l'étude comparée entre karstification et tectonique dans le département de La Vienne (France)	259
Collignon Bernard	Etude géophysique et piézométrique d'un karst côtier à Zanzibar	263
Dublyansky Yuri V.	Transition between hydrothermal and cold-water karst	267
Guyot Jean-Loup, L. Melo Filho & A. Auler	Régime hydrologique et flux de matières dissoutes du karst de São Domingos, Goiás, Brésil	271
Herold Th., W. Balderer & P. Jordan	The influence of pre-existing and orogenic faults to the structures on modern groundwater circulation of two karstic aquifers in the southernmost anticline (Weissenstein) of the folded Jura (Switzerland)	275
Knez Martin	Speleogenesis of phreatic channels in bedding-planes in the frame of karst aquifer (Skocjanske jam Caves, Slovenia)	279
Larocque Marie, A. Mangin, M. Razack & O. Banton	Caractérisation du karst de La Rochefoucauld (Charente, France) à l'aide des analyses corrélatoire et spectrale	283
Lauriol Bernard, I.D. Clark & J. Cinq-Mars	Hydrologie karstique en région de pergélisol: l'exemple du Yukon septentrional, Canada	287
Maréchal Jean-Christophe, M. Looser & A. Dematteis	Caractéristiques hydrogéologiques de deux aquifères calcaires des Préalpes romandes	291
Mijatovic Borivoje F.	Aspect hydraulique de l'écoulement karstique et ses conséquences sur le fonctionnement du système aquifère	295
Mouret Claude & F. Brouquisse	Les écoulements karstiques du polje de Ban Vieng, Laos central	299
Reichert Barbara, H. Hötzl, W. Stichler & P. Trimborn	Hydrodynamic Behavior of a Karst Aquifer (Trnovski gozd Plateau, Slovenia)	303
Rousset Claude	Structure tectonique et typologie karstique: cas des karsts de Vaucluse et de Port-Miou (région Provence - Alpes - côte d'Azur, SE de la France)	307
Sbai Abdelkader	Approche de la structure et du fonctionnement d'un bassin hydrologique en pays calcaire: exemple du bassin du Suran, Jura méridional	311
Smart Chris C.	Hydrogeology of glacial and subglacial karst aquifers: Small River, British Columbia, Canada	315
Gorbunova K.A., N.G. Maximovich & S.M. Blinov	Underground water level regime of the Kungur cave region	319
Lauritzen Stein-Erik	Groundwater recharge in thermoglacial karst springs, South Spitsbergen ...	320
Maucha Laszlo	Studies on the mechanism of tidal phenomena observed in the Aggtelek karst region.....	321

Délimitation du bassin versant karstique de la Bienne (Haut-Jura, France) par la géologie et les essais de traçage

par Robert Le Pennec

Association Spéléologique de Saint-Claude, 11, rue du Belvédère, F - 39200 SAINT-CLAUDE

Abstract :

The Bienne is a left bank tributary of the river Ain, whose upper topographical watershed is including a significant number of closed basins and watercourses or lakes leakages. Since the last 30 years, a 72 tracing tests have been performed and enabled us to appreciate the actual size of the karst area which is feeding the upper valley of the torrent. While replacing these tracing tests in the structural framework of the folded Upper Jura, it is possible to divide this area into 14 hydrogeological units. The largest of them, the Grandvaux synclinorium, is more than 30 km long and is including the longest underground flow in the Franche-Comté, originating in the Chaumusse sinkhole and the Enragé spring.

Résumé :

La Bienne est un affluent de la rive gauche de l'Ain, dont le haut bassin versant topographique comporte de nombreux bassins fermés et des pertes de cours d'eau ou d'émissaires de lacs. Depuis plus de 30 ans, 72 essais de traçage ont permis d'apprécier l'étendue réelle de la zone karstique alimentant la haute vallée du torrent. Replacés dans le contexte structural du Haut-Jura plissé, ces traçages permettent une subdivision en 14 unités hydrogéologiques. La plus grande d'entre-elles, le synclinorium du Grandvaux, fait plus de 30 km de long et inclut la plus longue circulation souterraine de Franche-Comté, entre la perte de la Chaumusse et la source de l'Enragé.

1. Bassin versant topographique

Vers le Nord (fig. 1), le bassin de la Bienne est séparé de celui de l'Orbe par le village des Rousses et le mont Risoux. Vers l'Ouest, le secteur des Crozets est drainé de manière aérienne vers la Bienne, mais le bassin du Grandvaux est fermé autour du lac de l'Abbaye. Le ruisseau d'Heria se jette dans la Bienne à Jeurre, mais le lac d'Antre est situé dans un bassin fermé. La limite ouest, avec le bassin de l'Ain, est donc difficile à percevoir. Vers l'Est, les reliefs des Molunes et Bellecombe séparent la Bienne de la Valsérine. Au Sud, la limite topographique passe entre Oyonnax et Viry. Enclavée dans ce secteur, la dépression du lac de Lamoura n'a pas d'exutoire aérien. Ce grand secteur ainsi défini présente donc un nombre important de zones problématiques.

2. Structure

Le Haut-Jura (fig. 1 et 2) est une succession de plis complexes d'orientation générale NE-SW. Les anticlinaux de Jurassique supérieur ou moyen chevauchent généralement vers l'Ouest des synclinaux à cœur crétacé et tertiaire, souvent empâtés de dépôts glaciaires. L'ensemble des plis est tronçonné par deux grands accidents transverses : celui de Morez et celui de Saint-Claude, et les plis sont affectés transversalement par deux abaissements axiaux : celui de Morez qui fait chuter les axes de 200 m et celui du Flumen (de 400 m). La haute vallée de la Bienne traverse en cluse les reliefs du Haut-Jura : cluses de Morez, de Vaux-les-Saint-Claude, de Jeurre et de Dortan-Lavancia, mais elle suit un axe synclinal entre Morez et Saint-Claude. Les séries calcaires atteignent 1200 m d'épaisseur, et la Bienne les entaille sur 800 m, dans des gorges sauvages.

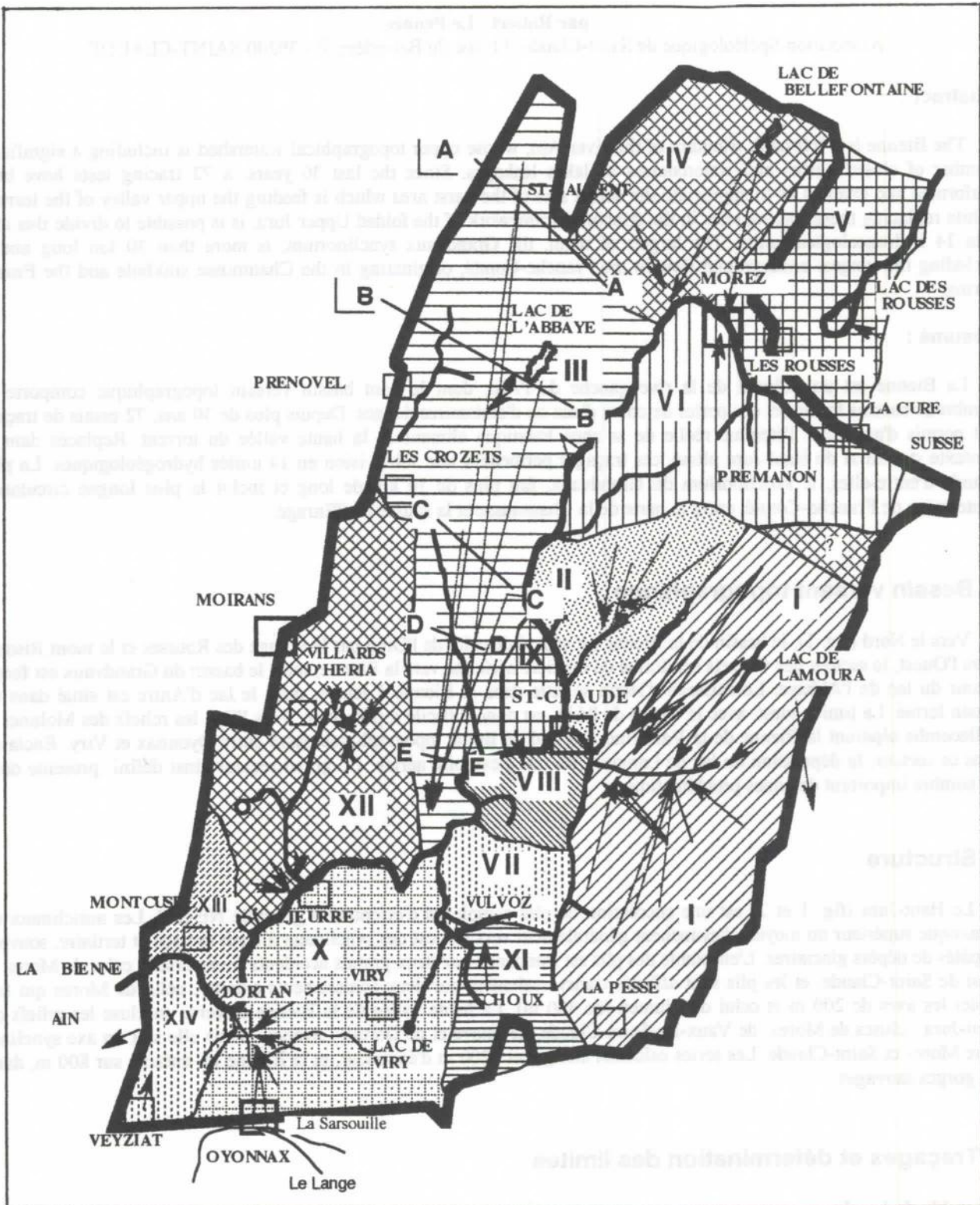
3. Traçages et détermination des limites

Ensemble du bassin :

Les sources karstiques sont situées au sommet des différents niveaux marneux, les plus importantes étant à la base du Séquanien. Plusieurs sources vaclusiennes ont un conduit terminal de plus de 50 m de profondeur : Bief Noir, 85 m; Doye Gabet, 77 m; Bief Goudard, 60 m; Brive, 56 m. D'autres émergences peuvent être masquées sous les dépôts glaciaires, surtout vers Lavancia où le réseau des Bracelettes est très peu connu.

Les traçages effectués dans le Haut-Jura (fig. 1) montrent une tendance générale au drainage dans l'axe des plis : le secteur des Lacs de Bellefontaine et des Mortes résurge à la source de la Doye Gabet sur l'abaissement axial de Morez, la

région comprise entre le secteur de Lamoura et la Pesse sur les émergences de celui du Flumen (MUDRY & ROSENTHAL, 1977). A partir des différents essais de treçage, des cours d'eau principaux et de la structure (sommets d'anticlinaux dans le sens longitudinal, zones d'élévation axiale des plis dans le sens transversal), on peut subdiviser le Haut-Jura en quatorze unités à drainage karstique (fig. 1) :



A-A : Tracé des coupes de la figure 2

Fig. 1 : Les 14 zones hydrogéologiques du Haut-Jura et le bassin versant de la Bienne.

I : Lamoura - la Pesse	II : Longchaumois - Cinquétral
III : Grandvaux	IV : Bellefontaine - Morez - Forêt Mt-Noir
V : Risoux - lac des Rousses	VI : Jouvencelles - Longchaumois - la Mouille
VII : Vulvoz	VIII : crêt du Surmontant - Ranchette - Mt Chabot
IX : forêt d'Avignon	X : Viry - Oyonnax
XI : Choux	XII : Jeurre - lac d'Antre
XIII : Montcusel - Chancia	XIV : Veyziat - Uffel

Synclinorium du Grandvaux :

Les quatre zones majeures de drainage karstique du Haut-Jura sont le système de la Doye Gabet à Morez, le secteur de Lamoura-la Pesse, le système d'Oyonnax -Viry et le Grandvaux. Le synclinorium du Grandvaux est une zone relativement plane de 900 à 1000 m d'altitude. Les sources situées dans la vallée de la Bienne s'étagent entre 510 et 350 m. Un premier long traçage effectué depuis la perte du lac de l'Abbaye (FRACHON, 1965; MUGNIER & CHATELAIN, 1969) est réapparu à la source de l'Enragé. La source de l'Enragé qui est située dans la cour de l'usine Breuil à Chassal, a comme trop-plein la grotte de l'Enragé.

En 1994, 30 kg de fluorescéine ont été injectés au gouffre de la Tane à la Chaumusse (LE PENNEC, 1987 a et b), dans le but de délimiter l'unité en direction de l'accident de Morez. 25 jours plus tard, le traceur atteignait la résurgence de Brive (27 km), et le lendemain la source de l'Enragé (distance : 29,5 km, vitesse apparente : 47,2 m/h). L'eau a été tracée pendant 3 jours, mais non visible à l'oeil nu.

Cette relation souterraine, la plus longue de Franche-Comté, a montré une faible vitesse de circulation, comparativement aux autres traçages du Haut-Jura qui ont circulé à 100 m/h en moyenne.

Le Grandvaux est un synclinorium large au niveau de Saint-Laurent, où sont situées les pertes de (fig. 2, coupe AA). Il se rétrécit au niveau de Leschères (fig. 2, coupe DD) où il doit être chevauché par l'anticlinal du bois de Cuttura. La zone de sortie se situe donc dans le coeur d'un anticlinal pour l'Enragé (fig. 2, coupe EE), sur le flanc ESaint pour Brive, sur la rive gauche de la Bienne, à la faveur des écailles du Trunet. Cette unité hydrogéologique va donc de l'accident de Morez au Nord à celui de Vuache-Molinges au Sud, sans qu'on puisse savoir si ces failles jouent un rôle de limite.

4. Conclusion

L'utilisation combinée du traçage artificiel et de l'étude structurale du Haut-Jura permet la délimitation de 14 unités hydrogéologiques dans le bassin versant de la Bienne. Le drainage karstique se fait principalement dans la direction d'allongement des plis, polarisé par les grandes structures transversales : accident et zone d'abaissement axial de Morez, accident de Saint-Claude et zone d'abaissement axial du Flumen, accident de Vuache-Molinges.

Le synclinorium du Grandvaux apparaît ainsi comme une grande structure triangulaire de plus de 30 km de longueur, de 100 km² de surface, à drainage exclusif vers la vallée de la Bienne

Références

- ALABOUVETTE B. 1965 : Etude géologique de la région de Saint-Laurent (Jura). Thèse 3^e cycle Géologie, Besançon, 117 p., 14 pl HT.
- AUBERT D. 1965 : Calotte glaciaire et morphologie jurassienne. Ecl. Geol. Helv., vol. 58, 1, 555-578, 9 fig.
- BADIN L. & MAYA C. 1971 : Etude des circulations souterraines par fluorimétrie. SRAE Franche-Comté, 35 p., 10 fig., inédit.
- B.R.G.M. Cartes géologiques 1/ 50 000^e : Moirans-en-Montagne, Morez, Saint-Claude.
- CHAUVE P., DUBREUCQ F., FRACHON J.C., GAUTHIER A., METTETAL J.P. & PEGUENET J. 1987 : Atlas des circulations souterraines reconnues par traçage en Franche-Comté. 35 p., 9 fig., 17 pl. Ann. Scientif. Univ. Besançon, Géologie, Mém. H.S. n° 2.
- FRACHON J.C. 1965 : Le réseau de l'Enragé (Jura français) : une percée hydrogéologique de 21 km. Le Boueux, bull. trimest. de la Section de Genève de la Soc. Suisse de Spéléol., III, 4, 5-10.
- I.G.N. Cartes topographiques : 1/ 100 000^e Annecy-Lausanne ; 1/ 25 000^e : Morez et Saint-Claude.
- LE PENNEC R. 1987 : Inventaire des colorations. Assoc. Spéléol. de Saint-Claude, Bull. Spécial n° 3, 74 p.
- LE PENNEC R. 1987 : Inventaire des colorations du Parc Naturel Régional du Haut-Jura. Actes 8^e Congrès Nat. Soc. Suisse de Spéléol., 125-134.
- MUDRY J. & ROSENTHAL P. 1977 : La Haute-Chaîne du Jura entre Morez, Saint-Claude et la Pesse. Thèse 3^e cycle Géologie Besançon, 205 p., 95 fig.
- MUGNIER C. & CHATELAIN D. 1969 : Les recherches hydrogéologiques sur la percée karstique lac de l'Abbaye - résurgences de l'Enragé (21 km) et la récente coloration du Spéleo-Club Salinois (Jura). Ann. Spéléol. CNRS, t. 24, 2, 299-316, 2 fig.

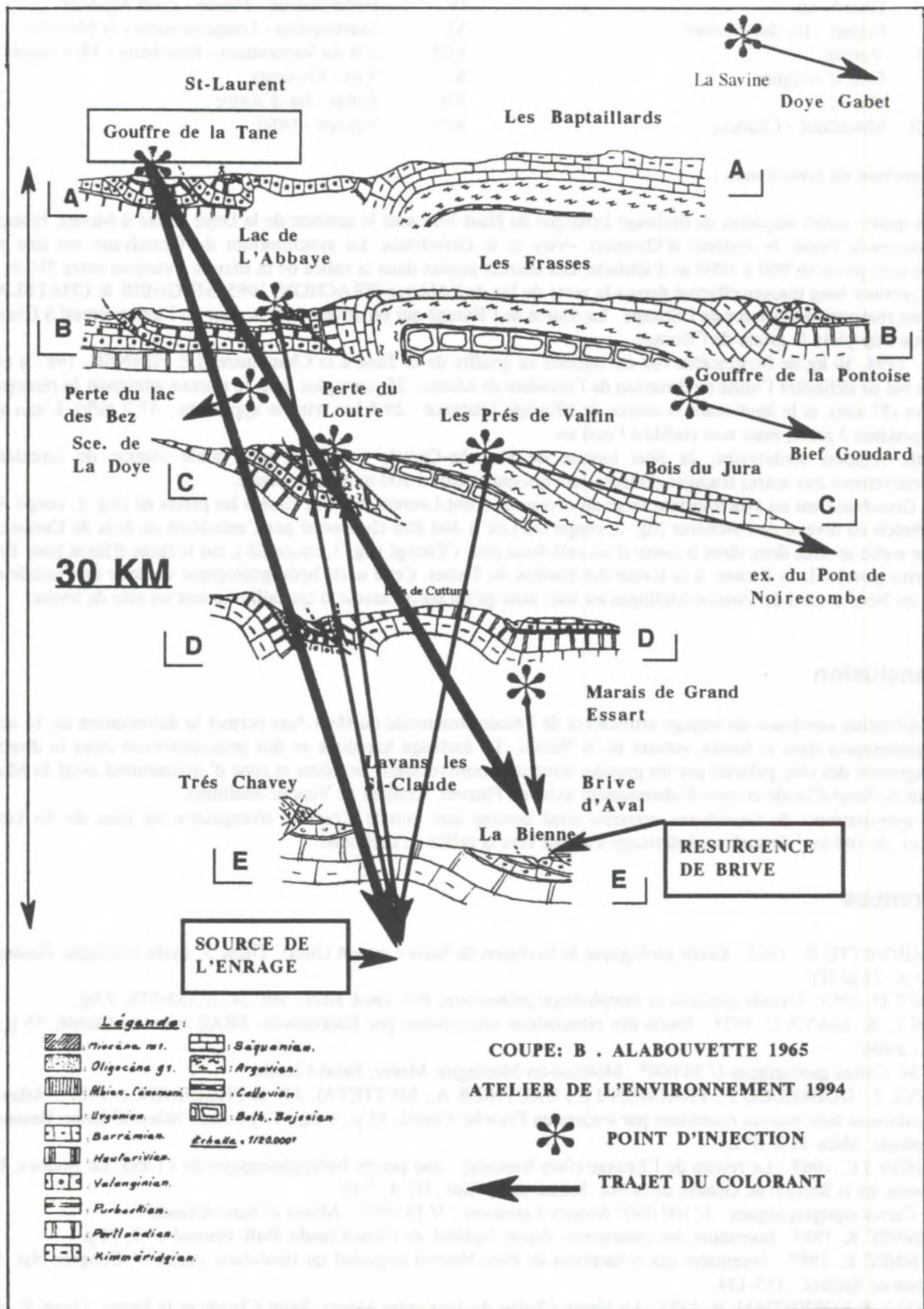


Fig. 2 : Coupes géologiques et traçages dans le synclinorium du Grandvaux (Unité III)

Dispersion and tailing of tracer plumes in a karstic system (Milandre, JU, Switzerland)

Pierre-Yves Jeannin¹ & Jean-Christophe Maréchal^{1,2}

¹ Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, Rue Emile-Argand 11, CH-2007 Neuchâtel, Switzerland

² Now at Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Geolep, CH-1015 Lausanne, Switzerland

Abstract

A large number of tracing experiments have been carried out in a karstic aquifer in the Swiss Jura. These allow to observe the evolution of a tracer plume along the length of a karst conduit. The method of Sauty was used to make possible the comparison between all the observed breakthrough curves.

The flow velocities and the dispersivities obtained are extremely variable. The dispersivities measured at different points along the length of an underground stream in the course of the same tracing experiment increase with distance (scale effect).

If the fit of theoretical Sauty curves on the experimental curves works well for rising limbs, this is not always the case for falling limbs: a tailing effect or lag of the experimental curves compared to the theoretical ones is often observed. Micro-tracings have shown that the lag effect is linked more to the karst conduit geometry than to the types of flows (turbulent or laminar). Measurable tailing effect is induced by the presence of a single conduit enlargement (also called pool). Further, the experiments have shown that a succession of enlargements along the length of the underground stream causes a clear increase in the dispersivity and a "homogenisation" of the recovery curve which shows up by the apparent disappearance of the lag effect.

These observations show clearly the influence of the heterogeneity of the karst conduit geometry on the breakthrough curves. This effect might be considered when one interprets the shape of the breakthrough curves especially for dispersivity estimation.

Résumé

De nombreux essais de traçage ont été réalisés dans un aquifère karstique du Jura suisse. Ils permettent d'observer l'évolution du nuage de traceur le long d'un conduit. La méthode de Sauty a été utilisée pour rendre les diverses courbes de restitution comparables.

Les vitesses et les dispersivités obtenues sont extrêmement variables. Les dispersivités mesurées en différents points le long du ruisseau souterrain au cours d'un même traçage augmentent avec la distance (effet d'échelle).

Si l'ajustement des courbes théoriques de Sauty sur les courbes expérimentales fonctionne bien sur la montée, il n'en va pas toujours de même pour la descente: un effet de retard (tailing effect) des courbes expérimentales par rapport aux courbes théoriques est souvent observé. Des micro-traçages ont montré que l'effet de retard est davantage lié à la géométrie des conduits karstiques qu'à la nature des écoulements (turbulents ou laminaires). Un effet de retard mesurable est induit par la présence d'un seul large bassin. Les expériences ont également montré que la succession de plusieurs bassins le long du ruisseau souterrain induit une nette augmentation de la dispersivité (effet d'échelle) et une "homogénéisation" de la courbe de restitution se traduisant par une disparition apparente de l'effet de retard.

Ces observations montrent l'influence des variations de la géométrie des conduits karstiques sur les courbes de restitution des traceurs. Cet effet devrait être pris en considération lors de l'interprétation des courbes de restitution notamment lors de l'estimation de la dispersivité du milieu.

1. Introduction

In karstic aquifers, the dispersivity values measured on breakthrough curves are often high (MEUS 1993), scale depending and the shape of the breakthrough curves is frequently strongly asymmetric (MARECHAL 1994). These results do not fit well with results of a theoretical 1-D homogeneous model, assuming that conduits are thin but very conductive features (pipes). The discrepancies between the 1-D model and the observations leads many authors to consider further processes generating dispersion namely adsorption-desorption (DE MARSILY 1986), a large molecular diffusion (SEILER *et al.* 1989, MALOSZEWSKI & ZUBER 1989), interaction with stationary water (BIVER 1993), the effects of dilution (ROSSIER & KIRALY 1992), etc...

This paper is focussed on describing the relation between the flow conditions in karst conduits and the breakthrough curves. The « low permeability volumes » surrounding the conduits in karst aquifers are not under consideration here.

Breakthrough curves could be observed along the path of an underground karstic flow and provide then informations about the dispersion processes which could be responsible for the strong asymmetrical breakthrough curves frequently observed in karst systems.

2. The test-field of Milandre

The drainage basin of the Milandre (13km²), situated in the north of Switzerland, contains an underground river - the Milandre - which can be followed upstream from the emergence point for 4.6 km (actual distance in the cave, equivalent to 3 km as the crow flies, figure 1). The exsurgence of the Milandre is made up of two principal springs, one perennial, the Saivu, with a discharge of 20 - 150 l/s and the other ephemeral, La Bâme, with a discharge of 0 to 1500 l/s. Four measuring stations were set up along the length of the underground river, allowing to measure the passage of tracers along the section to be observed. The measuring stations are situated at 4.6 km from the springs (station 1, upstream of the cave), at 4 km (station 1'), 3 km (station 2), 1.5 km (station 3) and 0 km (station 4, springs themselves) respectively. The flow is open along the largest part of the underground river, with only the downstream part, of about 500 metres in length being constricted.

About sixty tracing experiments were carried out on this site by injecting NaCl (50 to 500 kg) at different points in the drainage basin upstream from the known part of the cave. The breakthrough curves are obtained at each station by measuring the electrical conductivity of the water and by transforming it into NaCl concentrations.

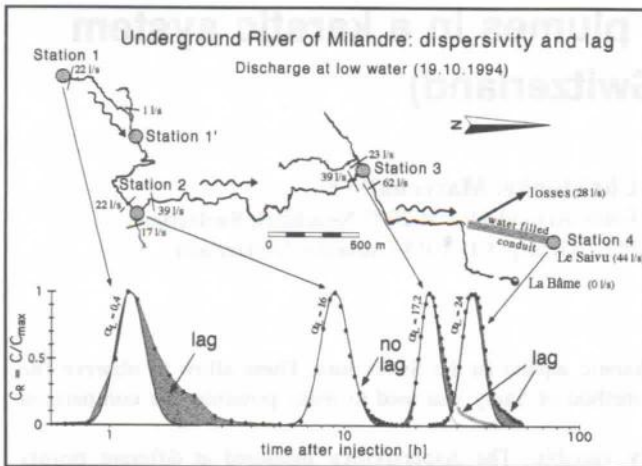


Figure 1 : The tracers are generally observed at four or five stations. The tracing experiment (Tracing 42 in table 1) presented here show a clear increase in dispersivity (α_L) along the underground course of the river (scale effect). The tailing effects vary a great deal along the length of the flow.

3. Aims and methods

A frequent tailing effect (strongly asymmetrical breakthrough curves) has been observed in Milandre. Does this retardation come from adsorption-desorption processes, from diffusion of tracer in the matrix, from dilution, or from any other process? Direct observations in the cave, make it possible to be almost sure that none of these processes are significant: there is no clays for adsorption-desorption, the porosity of the matrix is very low (<2%) and the flow velocity too high for a substantial diffusion in the matrix or towards immobile water, there is no tributary, at least along certain sections, causing a dilution effect. As scale and tailing effects are observed anyway, we will discuss here some further processes which may be responsible for. In order to be able to compare the many breakthrough curves we measured, only those carried out in similar hydraulic conditions (at low water levels) have been considered. The changes of the parameters as a function of discharge could be the subject of a future paper.

The breakthrough curve

Following the injection of a tracer, the concentration $C(X,t)$ of a solute obtained at an observation point situated at a distance X from the injection point is expressed as a function of time. This is the breakthrough curve.

The modal transit time (t_m) represents the largest number of tracer particles: it is therefore the time value with the highest probability. This time is used for calculating the «modal velocity» (X/t_m) which is the velocity given in table 1.

The Sauty method

In order to compare the breakthrough curves, the simplest possible model has been used (Sauty method). This model is easy to calibrate and does not introduce any of the dispersion processes described before. It provides physical parameters (dispersivity) but in this study, it is utilised as a tool of comparison, not as a physical model of the reality. We mainly focus on the tailing effect (difference between the model and the breakthrough curve) and the spatial variation of the calculated dispersivity (apparent dispersivity).

SAUTY (1977) provides a series of theoretical curves that have been calculated using a uniform, uni-dimensional, laminar flow model.

Each of the theoretical curves corresponds to a hydrodynamic Peclet number.

The experimental breakthrough curves are superimposed on the theoretical curves and adjusted to the one giving the best fit. From the appropriate Peclet number, we easily calculate the dispersivity which is equal to the distance divided by the Peclet Number.

The retardation or tailing effect

To obtain a dispersivity value, Sauty suggest to fit both the theoretical curves and the experimental curves on the rising limb of the peak (figure 2).

In most cases, the curve fitted on the rising limb does not then adjust correctly on the fall. It is therefore possible to make several successive fits and to determine several longitudinal dispersivities for different parts of the falling limb of the curve.

Generally the experimental curve remains above the theoretical curve of Sauty in the falling limb of the peak. This is the so called « tailing effect ».

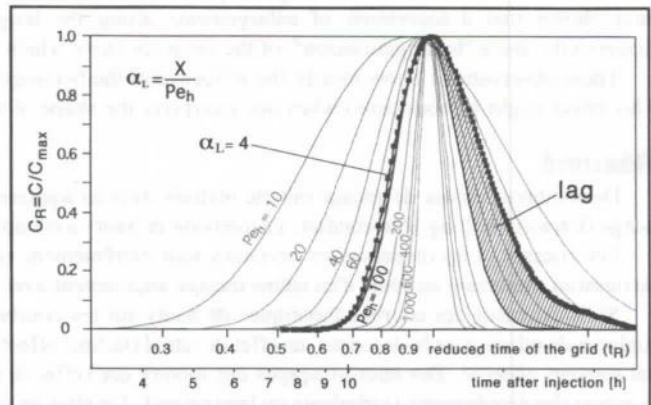


Figure 2 : Fitting of the curve on Sauty grids. The fitting is carried out on the rising limb of the curve and gives a value for dispersivity α_L . A lag effect of the experimental curve with respect to the Sauty model is visible.

4. Results and discussion

Apparent dispersivity: scale effect

The dispersivities measured on the rising limbs of the breakthrough curves at different points along the Milandrine during the same tracing (Table 1) almost systematically rise as a function of the distance.

This increase in dispersivity shows the existence of a scale effect: if the distance increases, the probability of encountering many and large dispersive phenomena also increases.

This scale effect is well known in heterogeneous media (PTAK & TEUTSCH 1994, SEILER *et al.* 1989, SAUTY & KINZELBACH 1988). The results presented here clearly show that this scale effect also exists in karstic conduits.

Tailing effects

OBSERVATIONS

Tailing effects appear very often at certain measurement points (Figure 1). The important tail observed at the station 1 (upstream) is probably due to the injection conditions and to the transfer through the unsaturated zone. As this part of the route cannot be observed directly, it is not considered here. The tail at station 2 is always very reduced, but the apparent dispersivity is always substantially higher than the one in station 1. At station 3, a tail is always observed and at the

exurgence (Saivu, pt 4)), although the major part of the tracings observed have shown no lag, the tracing presented on figure 1 shows a lag which cannot be ignored. Note that, at a given station, the size of the tailing effect is variable from one experiment to another.

	Station 1	Station 1'	Station 2	Station 3	Station 4
Tracing 1	408 m 15 l/s $\alpha=2.7$ $V=26$	1110 m $\alpha=6$ $V=57$		3805 m $\alpha=14$ $V=83$	5173 m $\alpha=26$ $V=106$
Tracing 2	402 m 13 l/s $\alpha=4$ $V=28$	1104 m $\alpha=11$ $V=52$			5167 m $\alpha=26$ $V=73$
Tracing 3		13 l/s 702 m $\alpha=4$ $V=124$			4765 m $\alpha=48$ $V=100$
Tracing 11	203 m 32 l/s $\alpha=20$ $V=21$				4968 m $\alpha=50$ $V=135$
Tracing 12	173 m 30 l/s $\alpha=3$ $V=32$				4838 m $\alpha=5$ $V=157$
Tracing 14	455 m 21 l/s $\alpha=3$ $V=40$	1157 m $\alpha=19$ $V=64$			
Tracing 23	176 m 32 l/s $\alpha=2$ $V=88$			3573 m $\alpha=12$ $V=114$	4941 m $\alpha=14$ $V=174$
Tracing 24	176 m 25 l/s $\alpha=2$ $V=69$			3573 m $\alpha=12$ $V=166$	4941 m $\alpha=25$ $V=143$
Tracing 25	461 m 24 l/s $\alpha=5$ $V=42$		2026 m $\alpha=5$ $V=123$	3858 m $\alpha=19$ $V=132$	
Tracing 40	176 m 30 l/s $\alpha=7$ $V=306$		1741 m $\alpha=17$ $V=229$	3573 m $\alpha=18$ $V=205$	
Tracing 41	40 m 26 l/s $\alpha=1$ $V=200$		1605 m $\alpha=16$ $V=217$	3437 m $\alpha=17$ $V=187$	
Tracing 42	40 m 22 l/s $\alpha=0.4$ $V=44$		1605 m $\alpha=16$ $V=178$	3437 m $\alpha=17$ $V=149$	4805 m $\alpha=24$ $V=161$

Table 1 : Dispersivities (α) in m and flow velocities (V) in ml/h measured at different distances along the length of the river's underground course. The dispersivities always increase with the measurement scale (scale effect). The discharge is given at station 1.

TURBULENT FLOW AS A DISPERSIVE PROCESS ?

The flow are turbulent on all the length of the underground stream (JEANNIN & MARECHAL 1996). Can turbulent flow cause the observed tailing effect ?

The existence of turbulent flow zones, downstream from which the theoretical and experimental curves can be fitted perfectly, seems to indicate that the tailing effect is not due to the turbulent flow regime. Further, the station 2, where the tailing effect is always reduced is located after a section of torrential flow.

To confirm this hypothesis, several "micro-tracings" (tracing experiments on sections of a few tens of metres in length) have been carried out. Let us consider the "micro-tracing" (A) depicted on figure 3. It was carried out in a zone 80 metres long, of turbulent torrential flows in a conduit of constant cross section (no major enlargements). The fitting of the experimental curve onto the Sauty model is excellent. This experiment empirically confirms that the turbulent flows are not the cause of the lag effect.

EFFECTS OF THE VARIATIONS IN CROSS-SECTION

The "micro-tracing" (B) was designed to evaluate the effect of an enlargement of the flow cross-section on the dispersion and tailing (figure 3). The tracer was injected upstream of an enlargement (1.5 m deep, 4 m large).

The breakthrough curve just before the enlargement does not show any tailing effect. Next to the outflow of the pool, the curve shows an important tail. The presence of a large and deep cross-section (pool) appears to produce a tailing effect. Other similar experiments have been carried out, all showing the important influence of variations in cross sectional area on tailing effects.

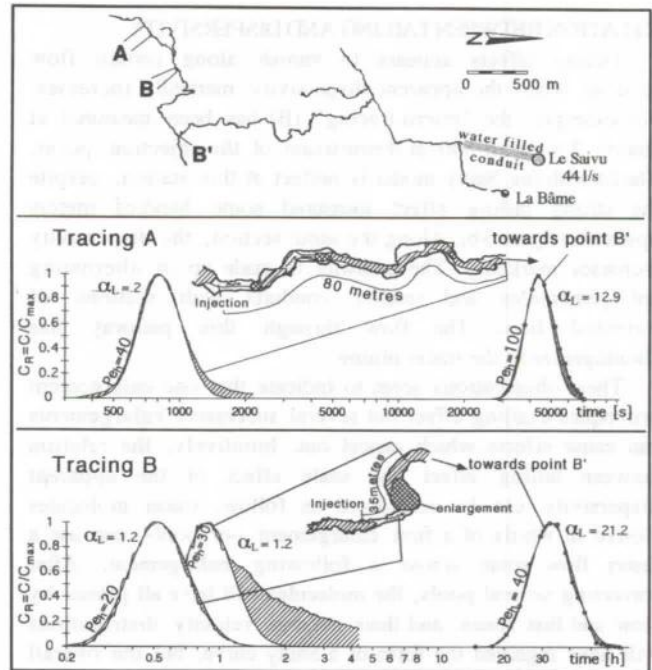


Figure 3 : "Micro-tracings" (A and B) used to measure the effect of certain heterogeneities at a local scale. The tracing A shows that the turbulent flows do not cause any tailing effects. The tracing B shows the importance of the tailing linked to the presence of a big enlargement on the flow path of the tracer. In the two cases, the lag effect has almost disappeared some hundreds metres downstream (point B').

This can be intuitively understood as follow: over a small cross-section, the flow velocity is more or less the same over the whole cross-section; in an enlargement, the flow velocity can be high in the middle and much lower or even reversed (whirlpool) on the edges. Part of the tracer can then be lagged or « trapped » in these longer flow routes.

A simplified numerical model of this effect has been done using a Darcy-flow model with strong variations of the flow cross-section (figure 4). After three enlargments, the breakthrough curve shows an important tailing effect. This model produces qualitatively adequate results, but does not represent a theoretical proof of the conceptual model. Models solving the full Navier-Stokes equations in three dimensions might be used for that (see HAUNS *et al.* 1997).

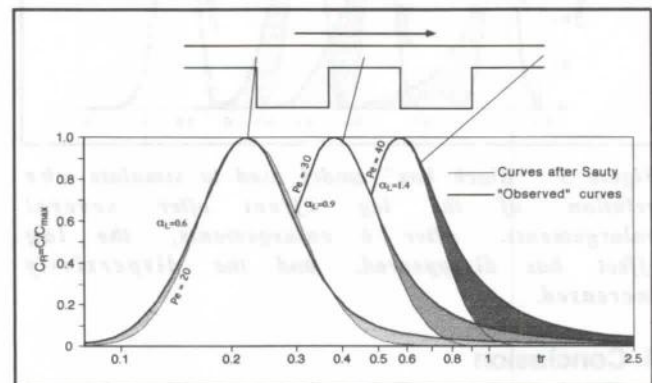


Figure 4: Finite element model of a porous medium with flow cross-section variations. The shape of the breakthrough curve is clearly modified by the presence of enlargements (tailing effect).

RELATION BETWEEN TAILING AND DISPERSIVITY

Tailing effects appears to vanish along certain flow sections where the apparent dispersivity markedly increases. For example, the "micro-tracing" (B) has been measured at station 2 situated 850 m downstream of the injection point. The fit with the Sauty model is perfect at this station, despite the strong tailing effect measured some hundred meters upstream (figure 3b). Along the same section, the dispersivity increases markedly. The pathway is made up of alternating enlargements and smaller conduits with sections of torrential flow. The flow through this pathway has "homogenized" the tracer plume.

These observations seem to indicate that one enlargement provokes a tailing effect but several successive enlargements can cause effects which cancel out. Intuitively, the relation between tailing effect and scale effect of the apparent dispersivity can be considered as follow: tracer molecules slowed in whirls of a first enlargement –or pool– can use a faster flow route across a following enlargement. After traversing several pools, the molecules will have all passed by slow and fast zones, and their average velocity distributions will have regained the form of a Sauty curve, but the overall apparent dispersivity will then be higher.

One can simulate the statistical decrease in the lag effect across several enlargements using a curve of residence time distributions (RTD) of a tracer cloud which has crossed one enlargement (large tailing effect), and then convolve it several times with itself. Figure 5 gives an impression of the form of the breakthrough curve as a function of the number of convolutions (number of pools). After six enlargements, the curve has a form very similar to the theoretical curves of Sauty, the dispersivity measured on the rise of the curve increases from one curve to the next.

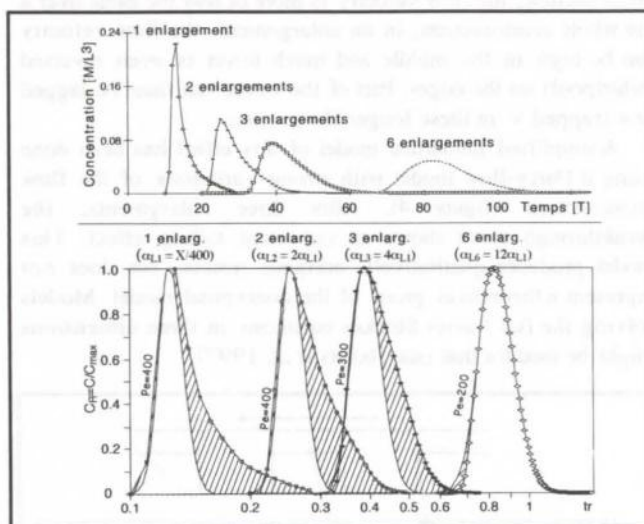


Figure 5 : "Black box" model used to simulate the evolution of the lag effect after several enlargements. After 6 enlargements, the lag effect has disappeared, and the dispersivity increased.

4. Conclusion

The observations made along the length of the underground river Milandrine document the large variability in velocity (between 17.5 and 365 m/h) and dispersivity (between 0.4 and 49.7 metres) of the tracers along the length of their route.

All the experiments carried out allow us to make four observations.

1) A scale effect is associated with the dispersivity measurements which increase with the scale of observation.

2) Turbulent, but regular flows - on a channel of constant cross-section- do not give rise to a measurable tailing effect, the experimental curves obtained at the end of such sections fitting perfectly to the Sauty curves.

3) The presence of a large basin (strong variation of the flow cross-section) causes a clear lag effect. This effect is very probably linked to the strong velocity gradients found inside the basins between slow and rapid zones.

4) The succession of big basins seems to cause an increase in dispersivity and the disappearance of the lag effect: one single basin produces a lag but several successive ones produce effects which cancel out towards the tailing, but produce a substantial increase of the apparent dispersivity.

Tailing effects are seen very often in the breakthrough curves measured at karst springs. They might come from the existence of several independent pathways, from a transient flow regime during the experiment, or from the injection conditions (strong tailing effect between the injection point and the point of arrival in the karst conduits). This paper shows that they might also be produced by strong heterogeneity of the flow cross-section along the karst conduits.

References

- BIVER, P. 1993. Etude phénoménologique et numérique de la propagation de polluants miscibles dans un milieu à porosité multiple. These Sciences Univ. of Liège, Belgium, 389 p.
- DE MARSILY, G. 1986. Quantitative hydrogeology. Groundwater hydrology for Engineers. Academic Press, 440 p.
- HAUNS, M.; HERMANN, F. & ATTEIA, O. 1997. Application of a CFD model to cave river hydrodynamics. This volume.
- JEANNIN, P.-Y. & MARECHAL, J.-C. 1996. Lois de pertes de charge dans les conduits karstiques : base théorique et observations. *Bulletin d'hydrogéologie No 14*, 149-176.
- MALOSZEWSKI, P. & ZUBER, A. 1989. Mathematical models for interpreting tracer experiments in fissured aquifers. In: "The application of isotope techniques in the study of the hydrogeology of fractured and fissured rocks", IAEA: 287-301.
- MARECHAL, J.-C. 1994. Etude et modélisation de l'hydraulique et du transport dans les drains karstiques. Master Thesis in Hydrogeology, Univ. of Neuchâtel, unpublished, 128 p.
- MEUS, Ph. 1993. Hydrogéologie d'un aquifère karstique dans les calcaires carbonifères (Néblon-Anthisnes, Belgique). Apports des traçages à la connaissance des milieux fissurés et karstiques. These Sciences Univ. of Liège, Belgium, 323 p.
- PTAK, T. & TEUTSCH, G. 1994. Forced and natural gradient tracer tests in a highly heterogeneous porous aquifer : instrumentation and measurements. *J. Hydrol.* 159: 79-104.
- ROSSIER Y. & KIRALY L. 1992. Effet de la dilution sur la détermination des dispersivités par interprétation des essais de traçage dans les aquifères karstiques. *Bull. du Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel* 11: 1-15.
- SAUTY, J.-P. & KINZELBACH, W. 1988. On the identification of the parameters of groundwater mass transport. In: (E. Custodio *et al.*, ed.), Groundwater flow and Quality modelling: 33-56.
- SAUTY, J.-P. 1977. Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçage. These Université scientifique et médicale et Institut National Polytechnique, Grenoble, 157 p.
- SEILER, K.-P., MALOSZEWSKI, P. & BEHRENS, H. 1989. Hydrodynamic dispersion in karstified limestones and dolomites in the upper Jurassic of the Franconian Alb, F.R.G. *J. Hydrol.* 108: 235-247.

EPIK, méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques pour la délimitation des zones de protection

par Nathalie Doerfliger et François Zwhalen

Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 11 rue E-Argand, 2007 Neuchâtel, Switzerland.

Résumé

La méthode EPIK est une méthode générale multicritère utilisée pour cartographier la vulnérabilité des aquifères karstiques et pour servir de base à l'établissement des zones de protection en milieu karstique. L'objectif de cette méthode développée avec la contribution de l'Office fédéral de l'environnement, de la forêt et du paysage (OFEP) est de produire des cartes de vulnérabilité pour des sources ou captages en milieu karstique. Les zones de vulnérabilité obtenues servent de base à la délimitation des zones de protection. Après avoir déterminé le bassin d'alimentation de la source, on procède en quatre étapes: 1) cartographie de l'Épikarst (approche morphologique), 2) Cartographie de la couverture protectrice, 3) cartographie des conditions d'infiltration et 4) caractérisation du développement du réseau karstique. Chacun des ces quatre critères est subdivisé en classes pondérées chacune par un coefficient théorique. La "superposition des cartes" par un système d'information géographique SIG des quatre critères et le calcul de chacune des zones résultantes permet d'obtenir une carte finale de la vulnérabilité. Cette méthode a fait l'objet des tests sur plusieurs sites en Suisse dont quelques résultats sont présentés ici.

Abstract

The EPIK method is a general multiattribute method used for the karst aquifer vulnerability mapping and to provide a base to assess the groundwater protection zones in the karst environment. The goal of this method developed with the support of the Federal Office for Environment, Forest and Landscape is to produce some vulnerability maps for karst spring watercatchments. According to the selected attributes, the obtained vulnerability zones can be a base to outline the groundwater protection zones. After having determined the spring watercatchment borderlines, we proceed in four steps: 1) mapping of the epikarst (geomorphological approach), 2) protective cover mapping, 3) infiltration conditions mapping and 4) characterization of the karst network development. Each of this attribute is subdivided in classes that are weighted by a theoretical coefficient. The four attributes maps are overlaid using a GIS and for each zone vulnerability degree is calculated; the resulting map is the vulnerability map. This method was tested in Switzerland on several sites, whose some results are here introduced.

1. Introduction

Les ressources en eau en milieu karstique sont importantes pour l'approvisionnement en eau dans la plupart des pays du monde, mais sensibles aux impacts anthropogènes, elles sont considérées comme vulnérables.

Cette vulnérabilité s'explique notamment par la structure fortement hétérogène des aquifères karstiques, avec d'une part des perméabilités très élevées dans les conduits souterrains entourés de blocs peu perméables et d'autre part des alimentations de surfaces localement très concentrées.

Vulnérabilité des aquifères

La vulnérabilité est une propriété intrinsèque des aquifères qui dépend de la sensibilité de ces derniers aux impacts naturels et anthropogènes (FOSTER S.S.D. 1987). Elle est utilisée pour caractériser, à l'aide d'information d'origine géologique et hydrogéologique, la sensibilité des aquifères aux contaminations anthropogènes, que ce soit sous forme ponctuelle ou diffuse.

Protection spécifique

Du fait de leur fonctionnement spécifique et de leur vulnérabilité, les aquifères karstiques requièrent une protection toute particulière. La loi fédérale relative à la protection des eaux de 1993, exige la délimitation des zones de protection S pour tous captages utilisés pour l'alimentation en eau potable: en milieu karstique leur délimitation repose principalement sur des critères morphologiques et quelques vitesses de transit établies par essais de traçage (Instructions pratiques pour la délimitation des zones de protection, 1977). Si la réalisation des zones de protection de tous les captages en Suisse est pratiquement terminée, malgré ce grand effort, la

protection des captages en zone karstique n'est encore souvent qu'imparfaite.

Au vu de cette situation, il s'est avéré nécessaire de proposer et de développer une méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques à partir des différents critères spécifiques du comportement hydrodynamique du système karstique. Cette méthode se veut être objective; elle est basée sur des critères géologiques et hydrogéologiques et est indépendante de l'occupation du sol et des considérations économiques.

2. Approche multicritère : la méthode EPIK

L'approche proposée ici pour évaluer la vulnérabilité des bassins d'alimentation des sources karstiques est une approche multicritère à index, appelée EPIK; elle prend en compte 4 critères, correspondant à quatre caractéristiques spécifiques du fonctionnement d'un aquifère karstique tel qu'il est décrit ci-dessous.

Après avoir déterminé les limites du bassin d'alimentation de la source, on procède en quatre étapes: 1) cartographie de l'épikarst, 2) cartographie de la couverture protectrice, 3) cartographie des conditions d'infiltration et 4) caractérisation du développement du réseau karstique et attribution d'un facteur global au bassin d'alimentation. La cartographie des critères subdivisés en indices s'effectue à l'aide de méthodes directes ou indirectes, locales ou globales telles que l'étude géomorphologique, l'utilisation d'un modèle d'altitude numérique, des sondages à la tarière, l'interprétation de photos aériennes, de la géophysique, des essais de traçage.

Fonctionnement d'un aquifère karstique

Les aquifères karstiques sont caractérisés par des particularités géomorphologiques, des phénomènes hydrauliques tels que l'existence d'importantes sources, de pertes, l'absence de réseau de drainage de surface, l'existence de réseaux karstiques et d'hydrogrammes typiques de source. A partir de ces caractéristiques, on peut proposer l'image suivante d'un aquifère karstique schématisé à la figure 1 :

"Un réseau de conduits connexes (réseau karstique) aboutissant à des exutoires drainant ou alimentant des volumes de roche fissurée et fracturée de faible perméabilité".

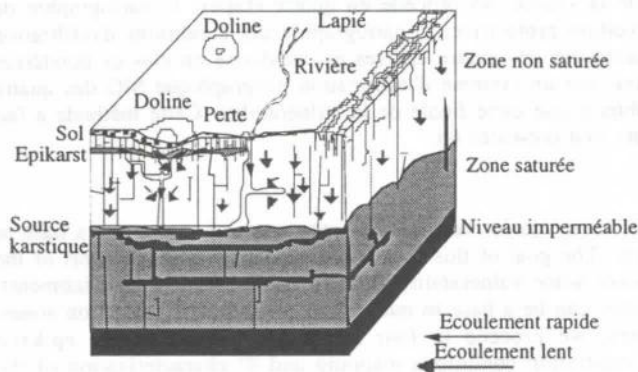


Figure 1: Représentation schématique du fonctionnement d'un aquifère karstique (DOERFLIGER et al., 1995).

Les critères de la méthode EPIK

A partir de ce schéma, 4 critères des plus pertinents sont différenciés comme suit :

Critère E: Epikarst (morphologie karstique)

- E1** - Gouffres et dépressions absorbant un cours d'eau
- Dolines
 - Lapiéz
 - Cuestas
 - Affleurements avec fracturation intense (bord de route / affleurement artificiel)

- E2** - Zones intermédiaires entre les alignements de dolines
- Vallées sèches

- E3** - Le reste du bassin d'alimentation

Critère P: Couverture protectrice

A. Sol reposant directement sur les formations calcaires aquifères ou sur des formations détritiques grossières très perméables (Ex. éboulis, moraines latérales...)

- P1** - 0 - 20 cm de sol
P2 - 20 - 100 cm de sol
P3 > 100 cm de sol

B. Formations géologiques peu perméables avec ou sans sol (Ex. limons lacustres, argiles...)

- P3** -> 100 cm au total de sol et formations géologiques peu perméables

P4 -> sol avec d'épaisses [8mètres] formations géologiques de très faible perméabilité [limons-argileux-silteux] (à vérifier de manière ponctuelle)

Critère I: Conditions d'infiltration

- I1** - Pertes pérennes et temporaires
- Lits et rivages des cours d'eau
 - Cours d'eau pérennes et temporaires alimentant une perte ou une doline
 - Cours d'eau infiltrants

A/ A l'intérieur du bassin versant des cours d'eau alimentant des pertes

- I1** - Partie du bassin versant drainée artificiellement
I2 - Partie du bassin versant non drainée artificiellement et dont la pente est supérieure à 10 % pour les zones de culture, 25 % pour les prés et les champs
I3 - Partie du bassin versant non drainée artificiellement et dont la pente est inférieure à 10 % pour les zones de culture, 25 % pour les prés et les champs

B / Hors des bassins versants des cours d'eau alimentant des pertes

- I3** - Surfaces au pied d'une pente jouant le rôle de collecteurs des eaux de ruissellement et pentes alimentant ces points bas (pentes supérieures à 10 % pour les zones de culture, 25 % pour les prés et les champs)
I4 - Le reste du bassin d'alimentation

Critère K: Réseau karstique

- K1** - Réseau karstique bien développé, à conduits décimétriques à métriques très peu colmatés et bien connectés
K2 - Réseau karstique mal développé, à drains ou conduits mal connectés ou colmatés, ou encore de dimension décimétrique et inférieure
K3 - Exutoire en milieu poreux avec effet protecteur (à vérifier)
 - Aquifère fissuré non karstifié

Pondération de la vulnérabilité

Pour chacun des critères E - P - I et K, on établit une carte de distribution spatiale de leurs indices. Ces 4 cartes sont digitalisées et transformées en format image (raster); ce format permet d'attribuer à l'aide d'un Système d'information géographique, les valeurs des classes en toute cellule du bassin. Ce dernier est quadrillé selon une maille de 20 mètres de côté. Puis les cartes sont superposées les unes aux autres: les valeurs des indices des classes sont additionnées et multipliées par le poids relatif, afin d'obtenir une carte synthétique de vulnérabilité (DOERFLIGER, 1996), selon l'équation de pondération ci-dessous :

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l \cdot (1)$$

avec F: facteur de protection
 E_i, P_j, I_k et K_l: valeurs des indices de chaque classe des critères / α, β, γ, δ: coefficient de pondération relative

Pour attribuer des valeurs aux coefficients de pondération, nous avons effectué différents tests de sensibilité et pris en compte notamment les considérations suivantes et :

-Une doline recouverte d'un sol épais (E1-P3) est plus vulnérable qu'une dalle calcaire compacte surmontée d'une mince couverture pédologique (E3-P1)

-Un cours d'eau alimentant une perte (I1) est très vulnérable, indépendamment de la couverture protectrice.

-Une vallée sèche (E2) est aussi vulnérable qu'un point topographiquement bas jouant le rôle de collecteur des eaux de ruissellement

En tenant compte de ces considérations et des différents essais de pondération effectués, les valeurs suivantes ont été retenues pour le calcul du facteur de protection :

1. Les indices des critères E, P, I et K sont pondérés ainsi :

E ₁	E ₂	E ₃	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
1	3	4	1	2	3	4
I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	K ₁	K ₂	K ₃
1	2	3	4	1	2	3

Rappel : La valeur de pondération la plus basse correspond à la situation la plus vulnérable

Tableau 1 : Pondération des indices des critères E, P et I.

2. Les critères E et I jouant un rôle moins important sur la protection du karst que le critère P, nous leur avons attribué un poids relatif plus important (vulnérabilité plus grande). Le poids attribué au critère E par rapport au critère I est identique. K a un poids relatif qui est situé entre celui de E et P.

α	β	γ	δ
3	1	3	2

Tableau 2 : Poids relatifs attribués aux critères E, P et I.

3. Lors du calcul du facteur de protection F pour les différentes combinaisons possibles, on obtient alors des valeurs allant de 19 à 34. Les combinaisons suivantes des classes des critères donnés sont incompatibles: K_i avec E₁, I₁ et P₃ ou P₄.

Détermination des zones de protection

La combinaison des différents facteurs de pondération propres à chaque critère selon l'équation ci-dessus permet d'attribuer en tous points du bassin d'alimentation l'une des trois zones de protection S.

F inférieur ou égal à 19	Zone S1
F entre 20 et 25	Zone S2
F > 25	Zone S3

Tableau 3: Equivalence Vulnérabilité et zones de protection .

3. Exemples d'application

Deux exemples d'application sont présentés. Il s'agit de la cartographie de la vulnérabilité du bassin d'alimentation des sources (Clarive et Tine) de la commune de St-Gingolph (VS) dans les Préalpes médianes plastiques et de la cartographie de

la vulnérabilité d'une partie du bassin d'alimentation des sources du Saivu, de la Font et de la Bâme à Bure dans le Jura Tabulaire (NW de la Suisse).

St-Gingolph - Préalpes valaisannes

Dans ce cas des pollutions fréquentes d'origine agricole (fumier et purin) affectent la qualité des sources de la Clarive et de la Tine. L'application de la méthode EPIK sur ce critère a pu mettre en évidence la relative importante vulnérabilité de ce bassin - surface considérable de zones de vulnérabilité moyenne à élevée (Figure 2). Le bassin d'alimentation est caractérisée par la présence majoritaire de la zone de protection S2 (Figure 3).

Bure - Jura Tabulaire

Dans le cadre de l'étude d'impact de la future route nationale N16, le bassin karstique des sources de La Font, du Saivu et de la Bâme a fait l'objet d'importantes études, hydrogéologiques notamment. Ce bassin (quelques 15 km²) se situe en Ajoie, dans le Jura tabulaire (aquifère développé dans les calcaires du Séquanien inférieur). Les eaux de ce site sont drainées par un réseau karstique souterrain, La Milandrine.

Les trois critères E, P, I ont été caractérisés à l'aide des données existantes à disposition (géophysique, levés de forages, photos aériennes,...) et des travaux de terrain (cartographie, sondages à la tarière à la main,...). Des études complémentaires (géophysique, forages, essais de traçage...) ont également été réalisées avec pour objectif de tester de manière approfondie la méthode EPIK. Les résultats obtenus suite à ces différents travaux de terrain ont permis d'apprécier les avantages de la nouvelle méthode (DOERFLIGER et al., 1996).

4. Conclusions et perspectives

La méthode EPIK est un outil tout à fait adapté à la gestion des ressources en eau en milieu karstique. Elle permet d'obtenir des cartes spécifiques de vulnérabilité; ces cartes constituent une nouvelle base pour l'établissement des zones de protection en terrain karstique. Les zones de protection sont ainsi mieux ciblées, en particulier les zones les plus restrictives (S1).

Combinée à une carte des risques potentiels, les cartes EPIK devraient à l'avenir faciliter l'établissement d'un règlement approprié relatif aux zones de protection en milieu karstique. Les exemples d'application de cette méthode sur plusieurs sites tests, ont démontré la faisabilité de cette nouvelle approche en terrain karstique.

A ce jour, le concept d'établissement de ces nouvelles cartes est relativement clair et les recherches actuelles s'orientent sur la caractérisation de l'épikarst (cf. PUECH, 1997, in ce colloque) et le transit de contaminants donnés dans la couverture protectrice.

La contamination des aquifères karstiques n'est pas une fatalité. Une délimitation des zones de protection en adéquation avec le fonctionnement hydrogéologique du karst, contribue grandement à la protection des sources et ressources en eaux souterraines karstiques.

Remerciements

Les auteurs de cet article remercient vivement l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage ainsi que le Service hydrologique et géologique national pour le soutien apporté lors du développement de cette méthode EPIK, ainsi que les membres du groupe karst de la société suisse d'Hydrogéologie. Nos remerciements vont également au canton de Berne, Office de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne .

Références bibliographiques

DOERFLIGER N et ZWAHLEN F. 1995. EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. International Symposium on Karst Waters and Environmental impacts, Antalya, 10-20 September 1995. Sous presse chez Baikema.

DOERFLIGER N, Tâche E. et ZWAHLEN F. 1996. EPIK, une méthode pour cartographier la vulnérabilité des aquifères karstiques: application à deux sites dans le Jura suisse. ESRA'96, L'eau souterraine en région agricole, colloque, Poitiers, 9-12 septembre 1996, S7-17-20.

DOERFLIGER N. 1996. Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer test analysis and

multi-attribute vulnerability mapping (EPIK method). Thesis, University of Neuchâtel, Switzerland, 225pp.

FOSTER S.S.D. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. IN Vulnerability of soli and groundwater to pollutants (W. van Duijvenbooden and H.G. van Waegeningh, eds). TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceedings and Information, No 38, pp. 69-86.

Instructions pratiques pour la détermination des secteurs de protection des eaux, des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines. 1977, révision partielle en 1982. Office fédéral de la protection de l'environnement.

$$F = E_i \cdot 3 + P_j + I_k \cdot 3 + K_l \cdot 2 \quad \text{avec } i = 1, 3, 4 - j = 1, 2, 3, 4 - k = 1, 2, 3, 4 - l = 1, 2, 3.$$

Rappel :

- Valeur basse = très vulnérable
- Valeur élevée = peu vulnérable

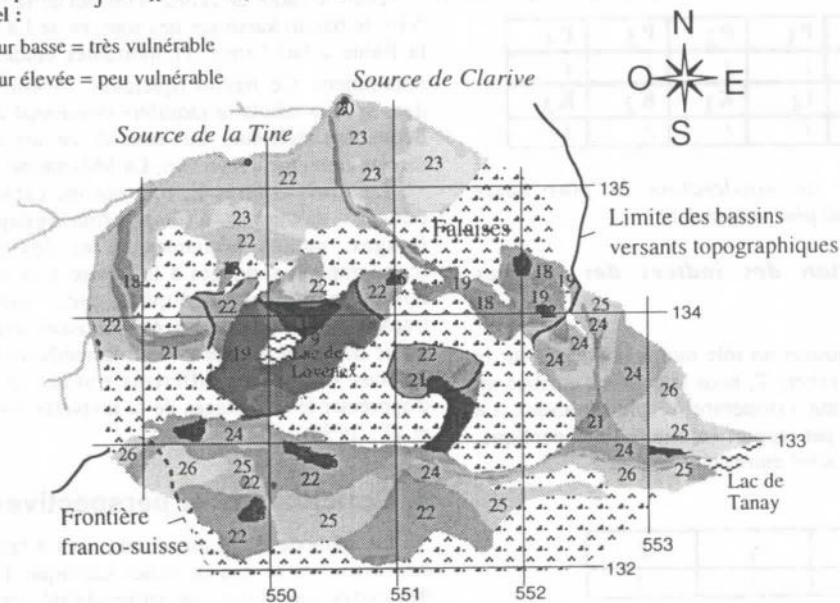


Figure 2: Carte de la vulnérabilité du bassin d'alimentation des sources de la commune de St-Gingolph (VS).

- S1 = facteurs de protection entre 9 et 19
- S2 = facteurs de protection entre 20 et 25
- S3 = facteurs de protection entre 26 et 32

Légende

- S1
- S2
- S3

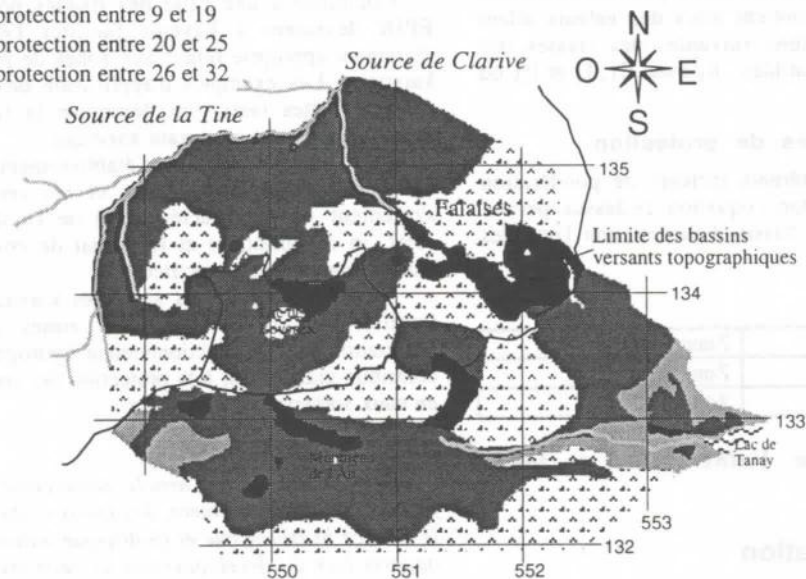


Figure 3: Carte des zones de protection du bassin d'alimentation des sources de la commune de St-Gingolph (VS).

Geophysical methods as a tool for speleological and geotechnical investigation in karst

Maira, Plateau de Bure (JU), Switzerland

Meier Edi¹; Huggenberger Peter²; Stiefelbogen Wilhelm³; Müller Imre³; Christe Romain⁴

¹ Edi Meier + Partner AG, Hard 4, CH-8408 Winterthur, 100777.3453@compuserve.com

² EAWAG, CH-8600 Dübendorf, Huggenberger@EAWAG.CH

³ Université de Neuchâtel, Centre d'Hydrogéologie, CH-2007 Neuchâtel

⁴ MFR Géologie-Géotechnique SA, Rue de Chauv 9, CH-2800 Delémont

Abstract

Ground penetrating radar (GPR) profiles have been recorded on the karst plateau of Bure in the NW part of Switzerland. The NE part of this plateau is drained by a subsurface river. The axis of the planned highway N16 crosses the karst plateau at the test-site near the locality of Maira. At this site, the water level is located about 50 m below the surface. Speleologists early on recognized chimney systems several meters in diameter which come up near to the surface. These chimneys potentially present a major source of difficulty in the highway construction, e.g. for foundations, blocking of tunnelling machines etc. After profile-mapping the area every 5 m with continuously measured Very Low Frequency Electromagnetics (VLF-EM) method, a series of GPR measurements followed in summer 1995.

The GPR experiments performed with sets of 50 MHz and 100 MHz antennae showed reflectors up to a depth of about 25 meters in the limestone sequences. The soil thickness in this case was in the order of decimeters. In areas of increasing clay-rich soil thickness, the penetration of the GPR waves is reduced to several meters. From both these methods, chimneys and the orientation of the main geologic structures can clearly be identified.

A comparison of the results of the VLF-EM and GPR measurements allows us to establish some general statements on the suitability of the two methods to address the questions mentioned above.

1. Introduction - regional setting

The Ajoie plateau is situated north of the external part of the Jura arc, near the French-Swiss border. The backbone of the plateau is formed by an essentially calcareous, subhorizontal Upper Jurassic series (approximately 300 m thick). It is cut by north-south trending, subvertical faults, whose throw gives the plateau a "piano key" structure. Karstification of the limestone is well-developed:

- the surface of the limestones is locally relatively karstified (epikarst) and covered by a soil which is generally relatively thin (< 0.5 m), but in some places, up to 15 m thick,

- several active caves are known, of these the largest is the Milandre cave, which is located just below the Swiss N16 highway project.

The Milandre cave network is situated 40 and 50 m beneath ground level. Speleological exploration has recently mapped chimneys going up to only a few meters below the surface. Some of these chimneys are located directly beneath the projected highway, especially in the area of the southern entrance of the tunnel.

These karstified features occur either as voids or as caves filled with an admixture of limestone blocks and fine sediments. These zones present collapse and settlement risks associated with the construction of the highway.

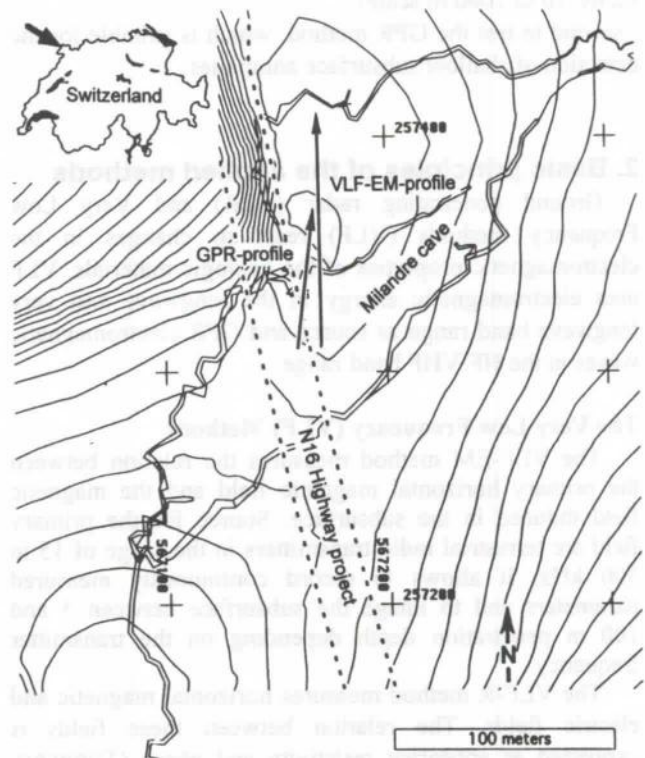


Figure 1: Location of the test-site at Maira

The following problem is to be solved by the engineers: karst phenomena such as those mapped by the speleologists (figure 2) probably occur elsewhere under the projected highway but near the surface voids can not be detected.

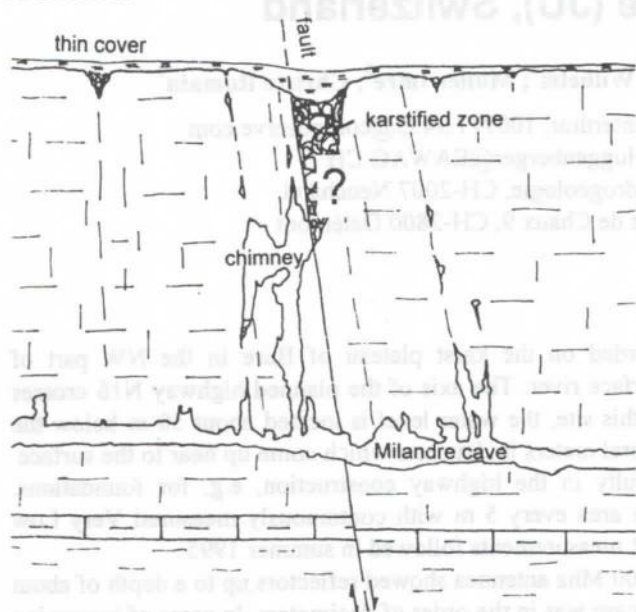


Figure 2: Cross-section of the Milandre cave network

The aim of this investigation with geophysical methods was to see how well karst phenomena may be detected by using a combination of different geophysical methods: - first a survey with VLF- methods (TURBERG, 1993; MÜLLER et al., 1995) has been carried out to define large scale geological structures (local regional geological faults: 10 to 1000 m scale) - second to test the GPR method, which is suitable for the detection of shallow subsurface anomalies.

2. Basic principles of the applied methods

Ground penetrating radar (GPR) and Very Low Frequency methods (VLF) react to changes in the electromagnetic properties of the geologic materials. VLF uses electromagnetic energy in the longwave and very longwave band range as source and GPR electromagnetic waves in the HF/VHF band range.

The Very Low Frequency (VLF) Methods

The VLF-EM method measures the relation between the primary horizontal magnetic field and the magnetic field induced in the subsurface. Source for the primary field are terrestrial radio transmitters in the range of 15 to 300 kHz. It allows to record continuously measured parameters and to image the subsurface between 5 and 100 m penetration depth depending on the transmitter frequency.

The VLF-R method measures horizontal magnetic and electric fields. The relation between these fields is expressed as apparent resistivity and phase (TURBERG, 1993). This method allows us to calibrate the VLF-EM measurements and to estimate the penetration depth of GPR.

The advantage of the VLF-EM is greater sensitivity to vertical structures and the possibility to record the data continuously. This results in higher lateral data resolution. Extreme points and the position of the strongest derivative give hints where to search for geological anomalies. The relation between the measured fields are complex numbers. The imaginary part is called „out of phase“ component and used for interpretation because it is more stable than the real component.

The Ground Penetrating Radar (GPR) method

The GPR system consists of a pair of separated transmitter and a receiver antennae. The transmitter antenna emits short electromagnetic pulses of a certain central frequency and bandwidth. Reflections occur when the electromagnetic waves meet boundaries between geological units of contrasting dielectric properties. The reflected waves are recorded by the receiver antenna. The elapsed time between the transmitted pulse and the received echo and the propagation velocities of the electromagnetic waves allow to estimate the depth of the reflections.

3. Results of the VLF-EM Survey

The three-dimensional representation of the data measured at Maira illustrates the VLF-EM method. The profiles in figure 3 have been chosen to compare the VLF-EM data with the GPR data and the position of the cave. Several frequencies were measured in NS profiles. Two transmitters in EW direction (18.3 and 162 kHz) are presented here. This configuration is sensitive to EW anomalies. Since this sensitivity depends on the transmitter direction, NS anomalies should be mapped by transmitters in NS direction and profiles in EW direction.

In the figure the position corresponds to the first rising ramp of the 18.3 kHz curve at a position with maximal first derivative. This correlation is possible in each of the measured profiles between $x = 567'100$ m and $x = 567'170$ m. Even some minor variations can be seen in parallel profiles. The effects observed for 162 kHz are much weaker. Its penetration depth is smaller than for 18.3 kHz because higher frequency results in better resolution but smaller penetration depth.

From the speleological investigations we know the location of the cave at $y = 257'342$ m to $y = 257'345$ m. In the 18.3 kHz curve we find a strong derivative at this point. This indicates a geological anomaly like a fault. A strong derivative can also be found in the 162 kHz curve, but at $y = 257'355$ m. We can not deduce the presence of a cave, but we have evidence for a north-south dipping fault.

4. Results of the GPR Survey

Evaluation of the suitability of the GPR method and optimization of the acquisition parameters

For planning the GPR Survey a model calculation was performed. Based on earlier VLF-R Surveys (TURBERG, 1993) the apparent resistivities and the lithologies of the geological formation at the test-site were known. With this prior information and the expected size and shape of the geologic inhomogeneities, we evaluated the optimum

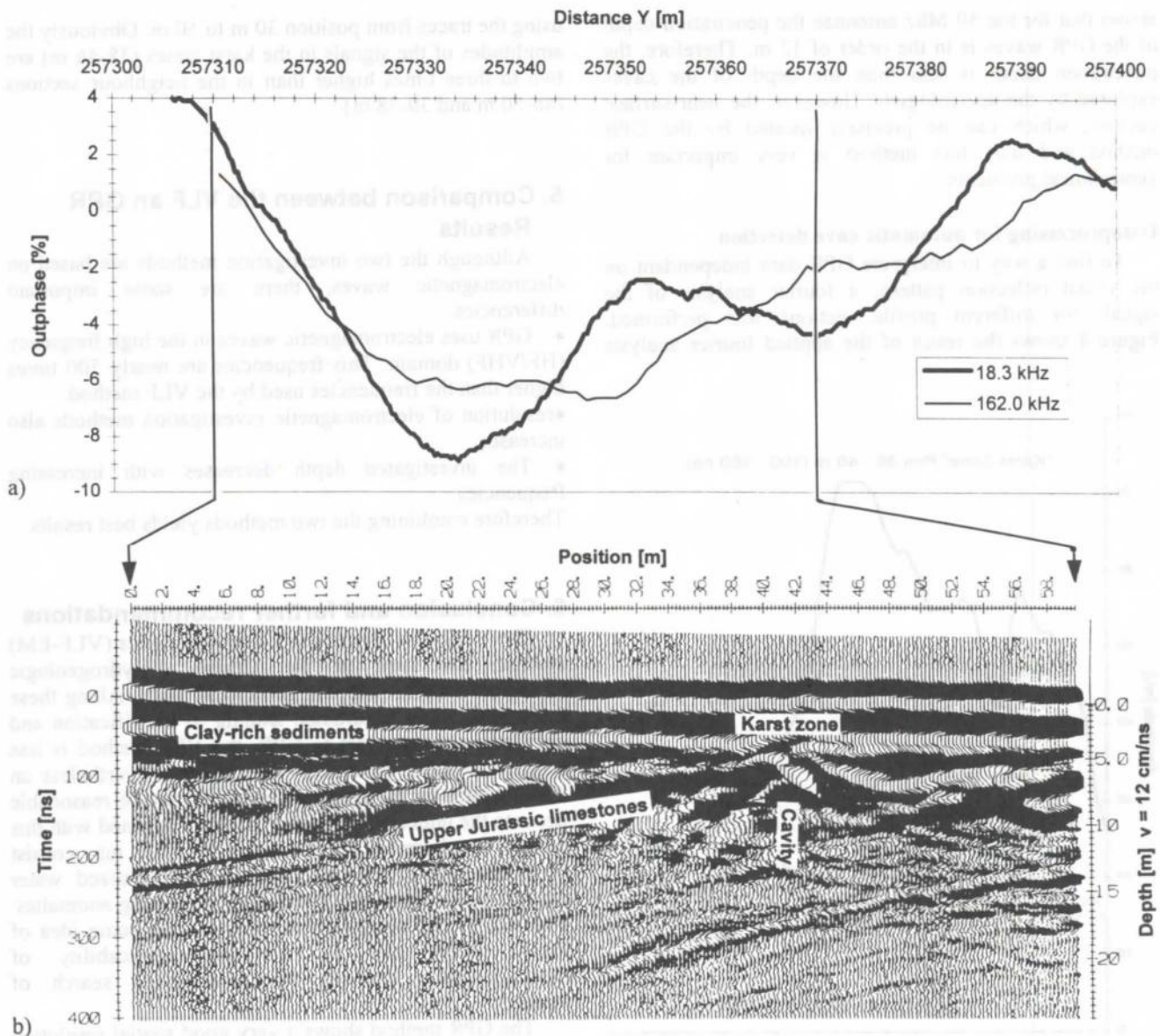


Figure 3: a) VLF-EM data recorded at Maira
 b) GPR data recorded at the same test-site as above.

antennae frequency and the acquisition parameters by using the radar range analysis proposed by ANNAN and DAVIS, 1977. As a result of these calculations for the 50 MHz antennae the maximum penetration depth was expected to be on the order of 26 m in high resistance areas and 6 m in areas of low resistance (assumptions: no soil cover, air-filled cavity, height 15 cm, diameter 80 cm).

Field Measurements

Seven profiles were recorded across the caves known from the previous speleological investigations. We recorded a radar trace every 25 cm. We used the 100 MHz antennae for two of the GPR profiles and the 50 MHz antennae for the other five sections. To determine the velocity distribution, a set of CMP-data (common mid point, ROBINSON, 1989; MEIER & HUGGENBERGER, 1992) was collected. To minimize the damage on the cultivated

land, the long antennae axis were oriented parallel to the profile trace.

Presentation of the data

GPR-data are presented in two-way-traveltime distance diagrams. The traces are displayed in the wiggle mode. For the conversion of traveltime to depth a mean propagation velocity of 12 cm/ns was assumed.

Interpretation

A continuous reflection ascends from a depth of 10 m at position 14 m to a depth of 5 m at position 40 m. Between 40 m and 42 m the reflections are discontinuous and dipping in both profile directions. A clear hyperbolic shape at 41 m is interpreted as a cavity or a karst deposit at the depth of about 7 m. The continuous reflections represent „undisturbed“ Upper Jurassic series. Figure 3b

shows that for the 50 Mhz antennae the penetration depth of the GPR waves is in the order of 12 m. Therefore, the penetration depth is less than the depth of the caves explored by the speleologists. However, the near-surface cavities, which can be precisely located by the GPR method and thus this method is very important for geotechnical problems.

Dataprocessing for automatic cave detection

To find a way to interpret GPR data independant on the visual reflection pattern, a fourier analysis of the signals for different profile sections was performed. Figure 4 shows the result of the applied fourier analysis

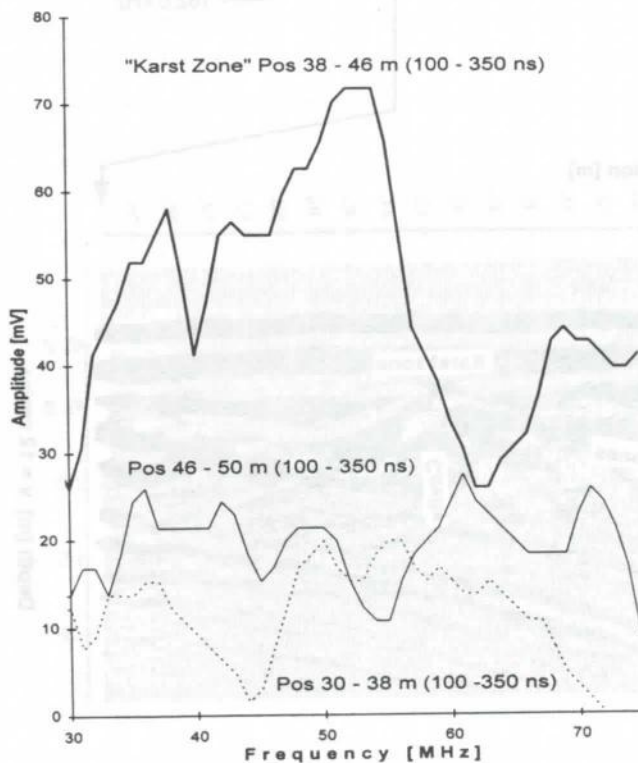


Figure 4: Fourier analysis of the data shown in figure 3b

References:

- ANNAN, A. P., DAVIS, J.L. (1977): Radar range analysis for geological materials, Report of activities, Part B; Geol. Surv. Can., Paper 77-1B
- DAVIS, J.L., ANNAN, A. P. (1989): Ground -penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting 37, 531-551
- MEIER, E., HUGGENBERGER, P. (1992): Georadar zur Kartierung der obersten 10 bis 20 Meter des Untergrundes. Wasser, Energie, Luft, 5/6, Verbandszeitung Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Baden (Schweiz), 111-113
- MÜLLER, I., STIEFELHAGEN, W. and INTCHI, A.R., (1995): Réflexions sur les résultats obtenus par l'enregistrement en continues des paramètres géophysiques, électromagnétiques (VLF-EM) et magnétiques, pour l'exploration hydrogéologique des aquifères karstiques (Grotte de Milandre, Jura, Suisse). Bulletin de la Société neuchâteloise de sciences naturelles.
- ROBINSON, E. A. (1989): Seismic velocity analysis and the convolutional model. Int. Human Resources Dev. Corp. Boston, 290
- TURBERG, P. (1993): Apport de la cartographie radiomagnetotellurique à l'hydrogéologie des milieux fracturés. Thesis, CHYN Neuchâtel, Switzerland, 132 p.

using the traces from position 30 m to 50 m. Obviously the amplitudes of the signals in the karst zones (38-46 m) are two to three times higher than in the neighbour sections (46-50 m and 30-38 m).

5. Comparison between the VLF and GPR

Results

Although the two investigation methods are based on electromagnetic waves, there are some important differences.

- GPR uses electromagnetic waves in the high frequency (HF/VHF) domain. This frequencies are nearly 500 times higher than the frequencies used by the VLF method.
- resolution of electromagnetic investigation methods also increases.
- The investigated depth decreases with increasing frequencies.

Therefore combining the two methods yields best results.

6. Conclusion and further recommendations

The Very Low Frequency Electromagnetics (VLF-EM) method developed at the Centre d'Hydrogéologie Neuchâtel enables mapping geological faults. Along these faults water may be drained leading to karstification and excavations. In contrast to GPR, the VLF method is less sensitive to poor conductors like caves. Nevertheless an investigation for the presence of caves may be reasonable because the underlying geology is easily detected with this method. Furthermore the coating of the caves may consist of a conducting material like clay. Mineralized water drained by the cave may also cause conducting anomalies. The aim of our measurements was to gain some idea of these effects and to test the applicability of electromagnetic methods for near-surface search of cavities.

The GPR method shows a very good spatial resolution of the detected anomalies. This allows to recognize shallow karstified zones. In non-destructive investigations the GPR method has become a common method. We suggest that amplitude analysis might be a useful tool helping to interpret GPR data in karst areas.

Nitrification des eaux rejetées par la STEP de La Chaux-de-Fonds - Suisse - lors de leur passage dans le système karstique de la Ronde

Par Paul-Etienne Montandon, Stéphane Gogniat, Pierre Rognon¹ et Jean-Jacques Miserez

Service de l'Hygiène et de l'Environnement, Serre 23, 2300 La Chaux-de-Fonds, Suisse

Résumé

Les eaux issues de la station d'épuration des eaux usées (STEP) de la ville de La Chaux-de-Fonds (40'000 habitants), Suisse se déversent dans la combe du Valanvron, formant le ruisseau de la Ronde. Ces eaux s'infiltrent progressivement dans un système karstique pour disparaître totalement après un parcours aérien de 1500m. Les résurgences de ce système se situent au niveau du Doubs.

Les recherches effectuées montrent que le parcours souterrain de la Ronde se déroule essentiellement en milieu à écoulement libre et que le système karstique présente de réelles capacités d'auto-épuration, en particulier la nitrification de l'ammonium présent dans les effluents de la STEP. A partir de l'analyse d'un élément conservatif (chlorures), on a pu montrer que le taux de dilution des eaux de la Ronde entre la STEP et les résurgences varie entre 3 et 6 selon les conditions pluviométriques. L'analyse des flux massiques des éléments rejetés par la STEP montre que, pendant la période de mesures, le 86 % de l'ammonium disparaissant dans le système karstique est oxydé en nitrate. Enfin, l'ammonium, provenant de la STEP et parvenant au Doubs après passage dans le système karstique, représente le 50 % des apports de cet élément sur le tronçon considéré ou encore le 35 % de la quantité totale d'ammonium transportée par le Doubs en aval de ce secteur.

Summary

Treated wastewaters coming from the sewage treatment plant (STP) of the city of La Chaux-de-Fonds (40'000 inhabitants), Switzerland, flow down the Valanvron valley where they become a small river that progressively infiltrates the karstic system and totally disappears after a course of 1500m. The resurgences of the system are located at the level of the Doubs river.

The present research shows that the underground course of the Ronde river essentially flows through an unsaturated zone and that the karstic system has real self purification capacity, namely nitrification of ammonium found in the STP effluents. By analyzing a conservative element (chlorides), we were able to estimate that the rate of dilution of the Ronde river between the STP and the resurgences varies from 3 to 6 in function of the level of precipitations. Analysis of the mass flow of pollutants rejected by the STP shows that 86 % of the ammonium, which disappears in the karstic system, is oxidized into nitrates during the period of measurements. Finally, we found that the ammonium coming from STP that reaches the Doubs river, after passing through the karstic system, represents the 50 % of the input of that compound over the considered section or 35 % of the total amount of ammonium carried by the Doubs river downstream from this area.

Introduction

En service depuis 1975, la STEP de La Chaux-de-Fonds (40'000 habitants) collecte toutes les eaux usées de la ville ainsi que les eaux pluviales du synclinal (24'600 m³/jour ou 285 l/s en valeur moyenne annuelle). L'épuration des eaux comprend un traitement mécanique, un traitement biologique par boues activées et une décantation finale. Du chlorure ferrique est ajouté à plusieurs étapes du traitement, notamment pour la déphosphatation. L'azote inorganique provenant de la biodégradation de la matière organique n'est pas nitrifié et est donc rejeté sous la forme d'ammonium.

Les effluents de la STEP empruntent le lit d'un ancien cours d'eau dans la combe du Valanvron où ils forment un ruisseau de faible débit appelé la Ronde, qui s'infiltré progressivement dans le sous-sol calcaire par plusieurs pertes diffuses pour disparaître totalement après un parcours aérien de 1'000 à 1'500 m en régime hydrique normal (figure).

Lors de son parcours souterrain, la Ronde rejoint le système d'écoulement karstique naturel. Après quoi, les eaux de la Ronde, gonflées et diluées par les eaux du système, ressortent par diverses résurgences au niveau du Doubs, dont les principales sont celles de la Verrerie et de la Rasse. Le temps de transit, qui varie en fonction des conditions pluviométriques, est de l'ordre de 3 à 7 jours. En dépit de la rapidité d'écoulement des eaux, ce système karstique présente des capacités intéressantes d'auto-épuration, en particulier l'oxydation en nitrates de l'ammonium rejeté avec les effluents de la STEP (Montandon et al. 1995). Lors de précipitations importantes, le trop plein des eaux, auquel s'ajoutent les eaux provenant d'écoulements périphériques, s'écoule dans la combe du Valanvron, passe par le Cul-des-Prés et rejoint le Doubs par l'étang de Biaufond.

Dans le présent travail, nous avons évalué les flux massiques des composés azotés inorganiques rejetés par la STEP et réapparaissant au niveau du Doubs. Il s'agissait d'établir la part de ce type de pollution dans le Doubs imputable aux rejets de la STEP.

¹ Adresse actuelle : Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, département de génie rural, Suisse

Hydrogéologie

La région de la Chaux-de-Fonds - la Ronde, qui appartient au domaine du Jura plissé (Bourquin et al. 1946, Bourquin et al. 1968, Favre 1911), se situe en domaine karstique. La surface totale du bassin versant a été estimée à 44 km² (Montandon et al. 1995). Les calcaires plus ou moins fracturés sont karstifiés et donc susceptibles d'être le siège d'aquifères.

Le dogger est essentiellement composé de calcaires et marno-calcaires plus ou moins karstifiés, avec quelques niveaux peu perméables fonctionnant comme aquicludes locaux.

Tous les étages du Malm sont largement karstifiés. L'oxfordien et l'argovien inférieur (couches de Birmensdorf) jouent probablement un rôle sur les circulations profondes. L'argovien supérieur, qui est en continuité avec les calcaires du reste du Malm, constitue l'aquifère le plus important de la région.

Le niveau de base de ce système est le Doubs, qui coule dans le synclinal du Pissoux-les Praillats. On peut noter que les sources du Dogger se situent au-dessus de celles du Malm en raison du chevauchement de l'anticlinal des côtes du Doubs. Finalement, on relèvera qu'il est difficile de jauger les sources du Malm, voire

même impossible, car elles sont proches du Doubs (Rasse) ou arrivent directement dans le lit de la rivière (Verrerie).

Méthodes

Les prélèvements ainsi que les analyses des chlorures, de l'ammonium, des nitrites, et des nitrates ont été effectuées comme décrit précédemment (Montandon et al. 1995). Le carbone organique total (COT) a été dosé par infrarouge après minéralisation à chaud avec un appareil Dorman 190. Enfin, l'azote total a été mesuré par la méthode de Kjeldahl modifiée. L'azote organique est minéralisé à chaud et en milieu acide; l'ammonium est ensuite dosé par colorimétrie. Les valeurs données sous l'appellation "azote total" correspondent donc à l'ensemble de l'azote organique et de l'ammonium.

Résultats

Afin d'évaluer l'impact de la STEP sur son milieu récepteur, nous avons analysé le devenir des polluants rejetés par la STEP dans le système karstique. Nous avons mesuré les substances polluantes, qui entrent dans le système karstique, à la sortie de la STEP et celles, qui en ressortent, à la résurgence de la Rasse, qui a été considérée comme représentative de toutes les autres résurgences de la Ronde.

Périodes de mesure	Facteur de dilution dans l'aquifère ¹	STEP			La Rasse		
		Ammonium	Nitrites (mg N/l) ²	Nitrates	Ammonium	Nitrates (mg N/l)	Nitrates
18 au 26.06.1992 ³	NE ⁴	18,1 ± 2,3	0,06 ± 0,03	0,22 ± 0,14	1,46 ± 1	0,22 ± 0,16	7,4 ± 0,5
17 au 30.03.1993 ^{3,5}	2,8 - 3,0	16,7 ± 6,1	0,26 ± 0,18	0,41 ± 0,28	1,49 ± 0,46	0,024 ± 0,01	6,75 ± 0,98
04.05 au 11.05.1994 ^{6,7}	4,7 - 5,8	12,5 ± 7	0,14 ± 0,1	1,29 ± 0,86	0,24 ± 0,64	0,009 ± 0,01	2,64 ± 1,1
21.06 au 05.07.1994 ⁶	4,0 - 4,2	20,7 ± 4,4	0,27 ± 0,48	0,64 ± 0,86	1,27 ± 0,73	0,42 ± 0,39	5,42 ± 1,28
28.04 au 15.06.1995 ^{6,8}	2,8 - 3,0	17,2 ± 6,2	0,073 ± 0,048	1,17 ± 0,76	0,68 ± 0,71	0,019 ± 0,013	5,35 ± 1,28
08.11 au 06.12.1995 ⁹	2,8 - 3,0	17,9 ± 7,2	0,089 ± 0,083	0,572 ± 0,648	0,975 ± 1,34	0,015 ± 0,009	4,94 ± 1,51

Tableau 1 : Facteurs de dilution et valeurs moyennes des composés azotés inorganiques à la sortie de la STEP et à la Rasse

¹ Les valeurs données correspondent à celles calculées pour une concentration en chlorures de 5 mg/l et respectivement 10 mg/l dans les eaux de dilution

² Mg N/l = milligramme d'azote par litre

³ Analyse effectuée à partir d'un échantillon journalier moyen

⁴ NE : non effectué

⁵ Température et teneur en oxygène; Rasse : 9,2 ± 0,39 °C et 1,13 ± 0,24 mg d'oxygène/l; STEP : 10,7 ± 1°C et 4,9 ± 1,1 mg d'oxygène/l.

⁶ Analyse effectuée à partir d'échantillons prélevés sur une période de 4 heures

⁷ Température et teneur en oxygène du 6 au 26 avril; Rasse : 8,6 ± 0,3°C et 4,7 ± 0,5 mg d'oxygène/l; STEP : 8,5 ± 1°C et 5,5 ± 0,5 mg d'oxygène/l.

⁸ Température et teneur en oxygène; Rasse : 9,25 ± 0,15 °C et 4,65 mg d'oxygène/l; STEP : 11,35 ± 1,75°C et 6,9 ± 0,3 mg d'oxygène/l.

⁹ Analyse effectuée à partir d'échantillons prélevés sur une période de 4 heures (STEP) ou d'échantillons ponctuels prélevés chaque jour (Rasse).

Nitrification de l'ammonium et diminution de la teneur en COT

Dans un système karstique comme celui de la Ronde, on connaît le débit des effluents de la STEP, mais il est difficile de jauger les débits des résurgences, en raison de leur proximité avec le Doubs ou parce qu'elles se situent directement dans le lit de la rivière. On ne peut donc pas estimer si la diminution de la concentration mesurée d'un polluant dans le système provient d'une adsorption, d'une transformation ou simplement d'une dilution.

Nous avons précédemment montré l'utilisation d'un élément conservatif, les chlorures (Montandon et al. 1995), pour analyser la vitesse d'écoulement et le taux de dilution des effluents de la STEP dans le système karstique. Le tableau 1 présente les valeurs de ce taux calculé pour les différentes campagnes d'analyses ainsi que les valeurs de concentration des composés azotés inorganiques dans les effluents de la STEP et à la résurgence de la Rasse. On constate une diminution de la concentration d'ammonium et une augmentation de la teneur en nitrates, la forme oxydée des composés azotés inorganiques. Ces résultats indiquent que l'ammonium rejeté avec les effluents de la STEP est oxydé en nitrates au cours du trajet souterrain. Cette oxydation ne s'effectue pas aux dépens de l'oxygène dissous dans l'eau. En effet, les teneurs en oxygène à la Rasse se situent généralement à une valeur comprise entre 11 et 40 % de la saturation, alors qu'elles s'élèvent à 70 % de la saturation dans les effluents de la STEP (tableau 1). La quantité d'oxygène dissous correspondant à la différence entre les teneurs mesurées à la sortie de la STEP et à la Rasse n'est pas suffisante pour oxyder l'ammonium, étant entendu que la formation d'une mole de nitrates consomme 2 molécules d'oxygène moléculaire, ou 64 mg d'oxygène par milliéquivalent de nitrate formé. On peut conclure que le trajet souterrain de la Ronde se déroule essentiellement dans des conditions ventilées.

Estimations des débits

Afin d'aborder l'aspect quantitatif de cette étude, nous avons mené une campagne du 9 novembre au 6 décembre 1995, pendant laquelle nous avons analysé des échantillons prélevés dans le Doubs en amont de la Verrerie et dans le lac de Biaufond, ainsi qu'à la Rasse et à la sortie de la STEP. Le choix des sites de prélèvement dans le Doubs se justifie par le fait que l'on n'a pas trouvé d'apports significatifs provenant de la STEP en amont de la Verrerie et au delà du pont, qui est situé en amont du lac de Biaufond (figure; Gogniat, résultats non publiés).

Les débits d'eau aux sites de prélèvement ont été déterminés ou estimés comme décrit ci-dessous. Les débits qui sont mesurés à la sortie de la STEP, nous ont été communiqués par le responsable de l'exploitation; ils ont varié entre 0,15 et 0,92 m³/s avec une valeur journalière moyenne de 0,27 ± 0,19 m³/s. Pour l'amont de la Verrerie, le débit du Doubs correspond à la somme du débit de restitution du barrage et du débit turbiné à l'usine électrique du Châtelot, qui sont situés en amont du point de prélèvement, respectivement à 8 et à 4 km. Pendant la période de mesure, les débits, qui nous ont été fournis par le responsable de l'usine du Châtelot, ont varié entre 0,4 et 43 m³/s, avec une valeur moyenne de 13,6 ± 13,6 m³/s. Les fluctuations importantes des débits sont dues à l'exploitation de l'usine hydro-électrique. On estime que le débit est le même à la Verrerie qu'à l'usine du Châtelot, car il n'y a ni apport significatif ni perte d'eau sur le tronçon séparant ces points.

Le débit moyen pour la période considérée a été estimé à l'aval du lac de Biaufond par l'analyse des chlorures, en supposant que l'augmentation de la concentration des chlorures dans l'eau du Doubs, entre l'amont de la Verrerie et le lac de Biaufond, est due uniquement à l'apport de cet élément provenant de la STEP de La Chau-de-Fonds (Rognon, 1996). On admet que les apports en chlorures étrangers à la STEP sont peu importants. Le débit obtenu est de 18 m³/s, soit une valeur 1,3 fois plus élevée que le débit déterminé à l'amont de la Verrerie. Cette valeur est raisonnable, car Matthey (1986) a montré une augmentation du débit moyen du Doubs, pour le mois de novembre, de 1,5 entre le lac des Brenets, situé à environ 12 km en amont de la Verrerie, et la Combe des Sarrasins, qui se trouve à 4 km en aval du lac de Biaufond. D'autre part, les valeurs des précipitations pour le mois de novembre 1995 se situaient à une valeur proche de la moyenne, c'est-à-dire à 127 mm ou 111 % de la valeur moyenne.

Enfin, le débit moyen de la Rasse pour la période considérée a été évalué à 250 l/s, une valeur comprise entre le débit d'étiage (45 l/s) et le débit en hautes eaux (300 l/s; Matthey, 1990).

Détermination des flux massiques des composés azotés inorganiques, du COT et des chlorures

Les valeurs moyennes de concentration des paramètres analysés figurent dans le tableau 2 et les flux massiques calculés à partir de ces valeurs et des débits d'eau sont donnés dans le tableau 3. On peut déduire du flux massique des chlorures que le 33 % des eaux provenant de la STEP ressort à la Rasse pendant la période de mesures, le 67 % restant réapparaissant principalement à la Verrerie et probablement par des apports diffus directement dans le Doubs (Gogniat, résultats non publiés). On constate encore qu'en moyenne 430 kg d'ammonium ont été déversés quotidiennement dans le système karstique et que seuls 19 kg réapparaissent à la Rasse; compte tenu de la proportion des eaux de la STEP parvenant au Doubs par la Rasse, on peut calculer les apports totaux en ammonium arrivant au Doubs à 58 kg/j (tableau 4), soit 13 % des quantités déversées par la STEP.

Par contre, le flux massique des nitrates augmente fortement de la STEP à la Rasse (tableau 3). La comparaison des flux massiques de l'ammonium et des nitrates montre que le 86 % de l'ammonium disparaissant dans le système karstique est oxydé en nitrates, ce qui confirme le pouvoir élevé d'auto-épuration.

On peut noter, enfin, la diminution du flux massique des nitrites entre La Verrerie et le lac de Biaufond (tableau 3), malgré l'apport dû à la STEP. Ce résultat suggère qu'une partie relativement importante des nitrites présents dans le Doubs est oxydée en nitrates.

Part des polluants provenant de la STEP transportés par le Doubs à Biaufond

Le tableau 4 montre les apports totaux de la STEP parvenant dans le Doubs. On constate que les apports en ammonium et en nitrates représentent environ la moitié des arrivées de ces éléments dans le tronçon La Verrerie - Lac de Biaufond, le reste provenant principalement des maisons isolées et de l'activité agricole.

Quant aux apports de COT issus de la STEP, ils correspondent à 15 % des arrivées de ces composés dans le tronçon considéré. Enfin, les quantités d'ammonium et de COT provenant de la STEP représentent le 35% et, respectivement, le 4% de la masse de ces polluants transportée par le Doubs en aval de Biaufond.

Paramètres	Effluents de la STEP	Amont Verrerie	Rasse	Aval Biaufond
Ammonium [mgN/l]	18,15 ± 7	0,044 ± 0,01	0,88 ± 1,3	0,103 ± 0,07
Nitrates [mgN/l]	0,5 ± 0,5	1,4 ± 0,2	4,9 ± 1,6	1,5 ± 0,3
Nitrites [mgN/l]	0,1 ± 0,1	0,024 ± 0,009	0,016 ± 0,009	0,015 ± 0,008
Azote total [mgN/l]	NE ¹	0,78 ± 0,5	1,1 ± 0,6	1 ± 0,18
Chlorures [mg/l]	150,4 ± 53,5	5,3 ± 1,5	54,5 ± 26	6,3 ± 1,8
COT [mg/l]	12,1 ± 2	4,6 ± 1,4	4,2 ± 1,1	4,6 ± 1,2

Tableau 2 : Valeurs moyennes des teneurs en composés azotés inorganiques, en chlorures et en COT dans le Doubs, à la Rasse et dans les effluents de la STEP (9 nov. - 6 déc. 1995)

Paramètres	Effluents de la STEP	Amont Verrerie	Rasse	Aval Biaufond
Ammonium [kgN/j]	430	52	19	160
Nitrates [kgN/j]	12	1649	106	2333
Nitrites [kgN/j]	2,4	28	0,34	23
Azote total [kgN/j]	NE ¹	929	23,7	1571
Chlorures [kg/j]	3561	6241	1177	9798
COT [kg/j]	286	5429	90,7	7092

Tableau 3 : Flux massiques des composés azotés inorganiques, des chlorures et du COT dans le Doubs, à la Rasse et dans les effluents de la STEP (9 nov. - 6 déc. 1995)

Paramètres	Apports totaux parvenant au Doubs sur le tronçon Amont Verrerie - Aval Biaufond (kg/j)	Apports provenant de la STEP ² (kg/j)	Proportion imputable à la STEP ³ (%)
Ammonium ⁴	102	58	54
Nitrates ⁴	684	321	48
Nitrites ⁴	/ ⁵	1,2	/ ⁵
Azote total ⁴	642	73	11,4
Chlorure	3557	3623	100
COT	1843	277	15

Tableau 4 : Apports dans le Doubs en composés azotés inorganiques en chlorure et en COT provenant de la STEP, après passage dans le système karstique

¹ NE : non effectué

² Ces apports ont été calculés en sachant qu'environ 30 % de ceux-ci rejoignent le Doubs par la Rasse

³ La part imputable à la STEP correspond au rapport des apports totaux de l'élément considéré provenant de la STEP sur les quantités de l'élément transportées par le Doubs en aval de Biaufond

⁴ kgN/j

⁵ Le flux massique diminue malgré l'apport dû à la STEP

Discussion

Nous avons montré que l'ammonium rejeté dans les effluents de la STEP est oxydé en nitrates au cours du trajet souterrain de la Ronde. Les résultats indiquent que cette nitrification ne s'effectue pas aux dépens de l'oxygène dissous et qu'elle a lieu pendant toute l'année. On peut conclure que le système karstique est ventilé et que le parcours souterrain se déroule essentiellement en milieu à écoulement libre. Dans un tel écoulement, l'élimination des polluants peut inclure des processus plutôt physiques, tels l'adsorption ou le fractionnement d'organismes vivants. Des études précédentes ont révélé une baisse importante de la concentration en bactéries fécales et en bactériophages de *E. coli* dans ce système karstique (Blant et Stettler 1982; Montandon et al. 1995), le taux de dilution n'étant pas suffisant pour expliquer ces pertes. En ce qui concerne les bactériophages, les analyses ont démontré que le taux d'inactivation des particules infectieuses dépend du type de bactériophage analysé, suggérant une inactivation d'ordre mécanique.

On admet généralement que la rétention des substances polluantes est faible en milieu karstique (Baylet et al., 1987; Caumartin, 1975; Miserez et al., 1976), en raison de la rapidité des écoulements d'eau et de l'insuffisance des couches argileuses qui fixent les polluants et permettent leur destruction par des micro-organismes. Or, les résultats présentés montrent que le système karstique de la Ronde possède des capacités d'auto-épuration qui consistent en une oxydation et non une simple dilution des polluants par des eaux d'infiltration. Une étude récente (Montandon et al., 1995) a d'ailleurs mis en évidence la biodégradation des hydrocarbures aromatiques de la série du benzène dans ce système karstique. En effet, une bactérie capable de dégrader ces composés en condition de laboratoire a été isolée à partir d'un échantillon d'eau prélevé à la Rasse. Les capacités d'auto-épuration de ce système se sont probablement développées de manière progressive depuis la mise en service de la STEP en 1975. Avant la construction de celle-ci, les eaux usées, qui étaient déversées dans des pertes situées 1,5 km en amont de la STEP (figure) et ressortaient aux résurgences de la Verrerie et de la Rasse, étaient contaminées par des teneurs élevées en ammonium (Schardt 1911, Schassmann 1965), suggérant que le système karstique n'était pas capable de nitrifier l'ammonium à cause de la charge trop élevée en matière organique des eaux usées non épurées. La présence d'une STEP, donc d'une source régulière en eaux usées épurées et riche en micro-organismes de différents types physiologiques, a probablement contribué au développement de conditions favorables à la rétention et à l'oxydation des polluants déversés dans le système.

On a, enfin, pu estimer l'impact de la STEP de La Chaux-de-Fonds sur le Doubs par l'analyse des flux massiques des polluants. La part des polluants transportés par le Doubs en aval de Biaufond et imputable à la STEP est vraisemblablement inférieure aux valeurs présentées dans le tableau 4. En effet, nous avons négligé, dans notre calcul du débit du Doubs, les arrivées en chlorures étrangers à la STEP qui parviennent dans le Doubs avec les eaux du bassin versant. Par conséquent, la valeur de débit utilisée pour calculer les flux massiques à Biaufond correspond à une valeur moyenne minimale (voir section « Estimation des débits »), donc à une sous-estimation des flux massiques à cet endroit.

En conclusion, cette recherche représente une première approche dans l'établissement de l'impact de la STEP actuelle sur le Doubs. A terme, nous pourrions déterminer l'effet, sur le milieu

récepteur, des améliorations de traitement, notamment la nitrification, qui interviendront avec la rénovation de la STEP actuelle.

Remerciements

Les auteurs remercient MM. J. Baumgartner, responsable de l'usine hydroélectrique du Châtelot, et R. Boillat, responsable de la STEP de La Chaux-de-Fonds, d'avoir transmis les données concernant les débits du Doubs et à la sortie de la STEP, Mme S. Daval, MM. J.-M. Erard et P. Erard, collaborateurs et stagiaire au Service de l'hygiène et de l'environnement, de leur excellente collaboration tout au long de ce travail, ainsi que Mlle D. Arnoux pour la mise en page du manuscrit.

Références

- BAYLET R., JOSEPH C., RODIER C., SOULIE M., SINEGRE F. : Variation de la qualité bactériologique des eaux karstiques au cours d'un épisode de crue : source du Lez (France) - Novembre 1982. Bull. du Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel, 7 : 253-264, 1987.
- BLANT J.D., STETTLER R. : Survie des bactéries indicatrices de pollution fécale dans un cours d'eau. Bull. Soc. Neuch. Sci. Nat. 105, 89-105, 1982
- BOURQUIN P., SUTER H., ET FALLOT P. : Carte géologique de la Suisse, feuille 15 Biaufond - Les Bois - La Ferrière - St.-Imier, 1946
- BOURQUIN P., BUXTORF R., FREI E., LUTHI E., MUHLETHALER C., RYNIKER K., SUTER H. : Carte géologique 1: 25'000 de l'atlas géologique de la Suisse, feuille 51 Val-de-Ruz, 1968
- CAUMARTIN V. : Les mécanismes de recyclage des eaux en milieu karstique. Actes du 5^{ème} Congr. nat. de spéléologie, septembre 1974, Interlaken, R. Gigon (Ed.) Soc. Suisse de Spéléologie, Neuchâtel : 79-85, 1975.
- FAVRE J. : Description géologique des environs du Locle et de la Chaux-de-Fonds. *Eclogae geol. Helv.*, XI: 369-475, 1911
- MATTHEY B. : Les ressources en eau du canton de Neuchâtel dans le cadre de l'aménagement du territoire. Matthey B. (Ed.), Montézillon (NE), Suisse, 1989.
- MATTHEY B. : Eaux souterraines. Dans : Centre d'identification, de traitement et de recyclage des déchets spéciaux CITRED, protection de l'environnement, étude de faisabilité, ATESA (éd), République et canton de Neuchâtel, dép. trav. publ., novembre 1990.
- MISEREZ J.J. SIMEONI G.P., BERNASCONI R., BRANDT C., DEPALLENS O., DOMONT G., KELLENBERER Y.S., MOESCHLER O., VOISIN G. : Essai sur le pouvoir d'auto-épuration des eaux karstiques. *Stalactite* 26/1, 13-28, 1976
- MONTANDON P.E., MAGES J.F., MISEREZ J.F. : Etude de l'écoulement du système karstique. Exemple de la vallée de la Ronde (NE, Suisse). Bull. du Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel, 14: 177-198, 1995.
- ROGNON P. : Impact sur le milieu récepteur d'une station d'épuration dont les effluents transitent par un système karstique. Travail de diplôme, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 1996.
- SCHARDT H. : Le cours souterrain de la Ronde. Bull. Soc. Neuch. Sci. Nat., 37 : 3-18, 1911
- SCHMASSMANN H. : Ursachen, Folgen und Bekämpfung von Grundwasserverunreinigungen in der Schweiz. In : Internationales Jahrbuch Chemische Industrie, Druck und Verlag Vogt-Schild AG, Solothurn, Schweiz p. 3-16, 1965.

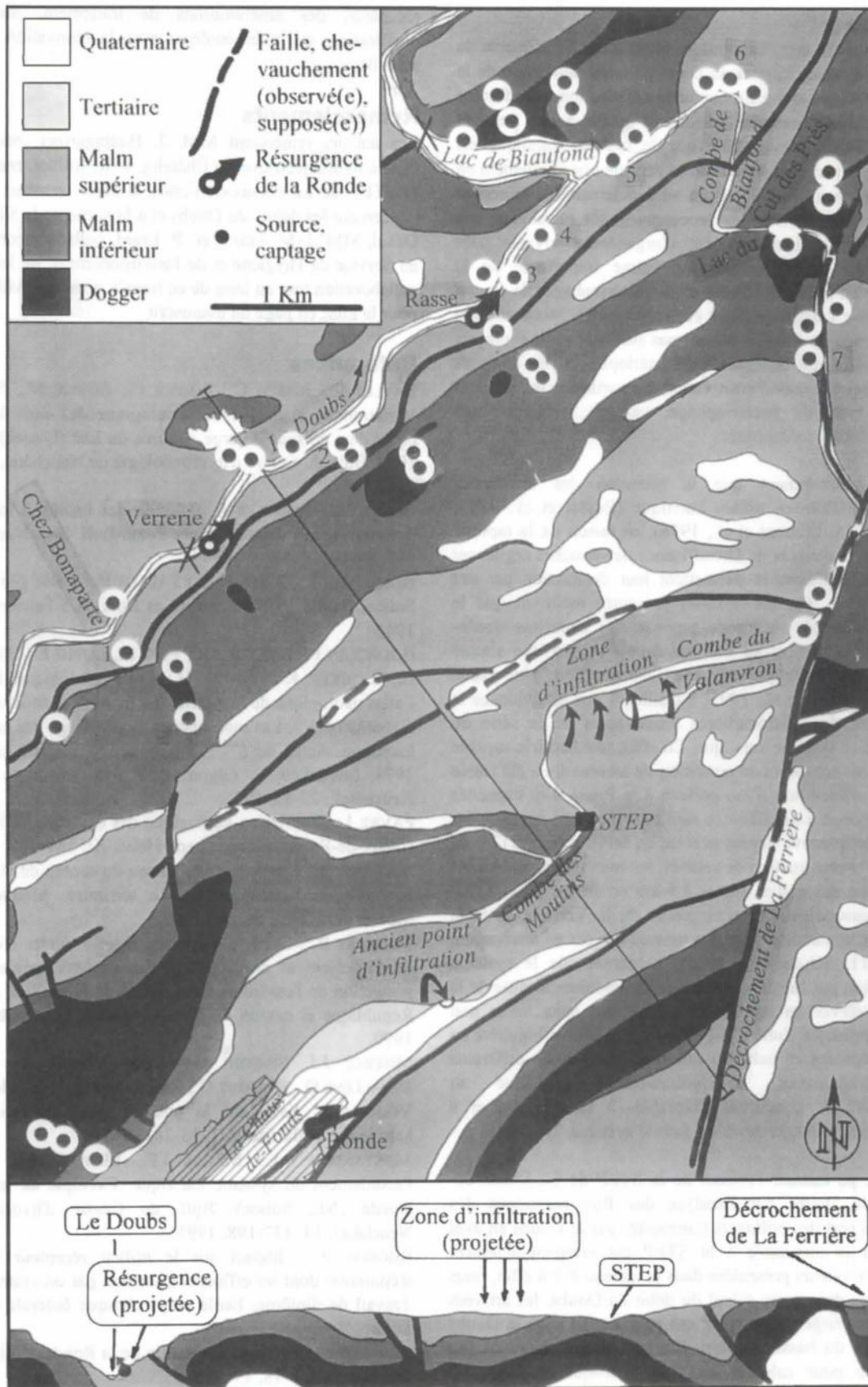


Figure : Carte de situation avec esquisse tectonique, coupe géologique schématique, zones d'infiltration ancienne (avant 1975) et actuelle de la Ronde, résurgences principales et autres sources ou captages : •1: Chez Bonaparte; •2: Moulinet; •3: Tunnels; •4: Dames; •5: Grande et Petite Rondes; •6: Bas de Combe; •7: Fief. Les points de prélèvement dans le Doubs sont indiqués par un X (Modifié d'après Bourquin et al. 1946).

«L'image» de la fracturation et de la karstification dans le jura suisse par prospection magnétique

par Imre Müller & Pascal Turberg

Centre d'hydrogéologie de l'Université, Rue Emile-Argand 11, CH-2007 Neuchâtel, Suisse

Abstract

Vulnerability of karstic aquifers essentially depends on fracturation and karstification patterns of the rock, mainly in its uppermost part called "epikarst". In the Swiss Jura mountain, frequency and intensity of fracturation is usually out of direct observation because of the presence of a Quaternary cover from eolian or glacial origin. These deposits which also massively infiltrate open fracture zones of the rock are made of minerals and fragments of igneous and metamorphic rocks, the magnetic susceptibility of which is high compared with the one of limestone. The use of magnetometry with continuous data recording along profiles enables the detection of weak distortions of the magnetic field caused by these Quaternary deposits and leads to an indirect imaging of fracture zones. Magnetometric measurements can therefore help hydrogeologists to carry out evaluations of vulnerability in karstic environments.

Résumé

La vulnérabilité des aquifères karstiques dépend essentiellement de l'état de fracturation et du degré de karstification de la roche calcaire, surtout dans la partie tout à fait superficielle des réservoirs appelée «épikarst». Dans le Jura suisse, la fréquence et l'intensité de la fracturation échappe souvent à l'observation directe, car les roches sont recouvertes de dépôts quaternaires, éoliens ou morainiques. Ces dépôts, qui infiltrent massivement les fractures ouvertes de la roche, contiennent des minéraux et des débris de roches ignées et métamorphiques dont la susceptibilité magnétique est élevée en comparaison de celle des formations calcaires. La prospection magnétique «en continu» permet de détecter les faibles distorsions du champ magnétique dues à ces remplissages quaternaires, et fournit ainsi une «image» indirecte de la fracturation qui s'ajoute aux observations usuelles dont l'hydrogéologue dispose pour estimer la vulnérabilité d'un aquifère calcaire.

1. Introduction

Pour faciliter le travail des hydrogéologues et améliorer de façon réaliste la rapidité et l'efficacité des travaux destinés à la protection des aquifères karstiques, une approche globale de la vulnérabilité a été récemment proposée (DOERFLIGER & ZWAHLEN, 1995; DOERFLIGER, 1996) sous le nom d'EPIK (Epikarst, Protective cover, Infiltration conditions, Karstic network). Basée sur une synthèse cartographique multicritère, où les facteurs essentiels influençant la vulnérabilité sont réunis, la méthode EPIK met l'accent sur l'importance de l'existence ou de l'absence d'une zone très perméable, hiérarchiquement organisée, à la surface de l'aquifère, appelée épikarst (MANGIN, 1975). L'épikarst joue en effet un rôle primordial sur la vitesse d'infiltration des eaux de surface, et par conséquent sur la vulnérabilité des eaux souterraines. Parmi différentes méthodes utilisées classiquement pour caractériser l'épikarst, les auteurs proposent les études géomorphologique, topographique, photogéologique ainsi que l'analyse de la fracturation.

En pratique, l'analyse de la fracturation n'est pas toujours réalisable, faute d'affleurement et faute de temps. De même, l'usage des documents photogéologiques est souvent difficile car la roche en place est fréquemment masquée par la couverture végétale.

De nouvelles méthodes électromagnétiques, efficaces et expéditives pour la reconnaissance de la fracturation ont été développées depuis une quinzaine d'années par le Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (MÜLLER, 1982; TURBERG & MÜLLER 1992 ; MÜLLER et al. 1995). La possibilité d'enregistrer en continu les paramètres de l'induction électromagnétique constitue actuellement un progrès important dans la détection des zones fracturées et dans la compréhension des structures hiérarchiquement

organisées. La saisie rapide des paramètres géophysiques, sans contact au sol, révèle une «image» géologique jusqu'alors inconnue, une nouvelle dimension pour la diagnose du milieu fracturé. Il n'est donc pas surprenant qu'encouragés et fascinés par ces premiers résultats, nous ayons cherché à expérimenter d'autres méthodes géophysiques sans contact au sol.

Une méthode intéressante et prometteuse est la magnéto-métrie, pour autant que les mesures du champ magnétique total et du gradient soient effectuées en continu ou avec une fréquence d'échantillonnage élevée. Ainsi, une empreinte magnétique du milieu calcaire de subsurface, susceptible de refléter son état de fracturation, peut être obtenue.

Le présent article illustre quatre séries de résultats magnéto-métriques obtenues sur des formations karstiques du Jura suisse.

2. Les propriétés magnétiques du karst

La prospection magnétique est la plus ancienne des méthodes utilisées en géophysique. Elle est fondée sur l'analyse des anomalies magnétiques, lesquelles sont des distorsions locales du champ magnétique terrestre. Ces anomalies sont provoquées par la présence, dans la roche, de corps aimantables, telle certains minéraux comme la magnétite et l'ilménite. La valeur du champ magnétique terrestre n'est pas constante dans le temps; elle connaît de faibles variations journalières dont il faut tenir compte lors des mesures. L'unité de l'intensité du champ total est le nanotesla (nT). Sa valeur est d'environ 30'000nT à l'équateur et 60'000nT aux pôles. En Suisse, elle est proche de 47'000nT. Le gradient magnétique est mesuré par deux capteurs superposés et est exprimé en nT/m. L'intensité d'aimantation

qu'induisent les minéraux et les roches sous l'effet du champ magnétique terrestre est une propriété physique qu'on appelle la susceptibilité magnétique (K). Elle est mesurée par des instruments appelés kappamètres. Nous citons (d'après MILSOM, 1992) quelques valeurs de susceptibilité, exprimées en SI (Système International). On remarquera que les écarts peuvent être considérables.

Schistes: 0 - 0.002	Rhyolites: 0.00025 - 0.01
Roches salines : 0.000 - 0.001	Calcaires: 0.00001 - 0.0001
Basaltes: 0.001 - 0.1	Gabbros : 0.001 - 0.1
Magnétite: 0.1 - 20.0	Pyrrhotite: 0.001 -1.0

En examinant ces valeurs, on comprendra que, normalement, dans les formations calcaires on ne trouvera pas d'anomalies magnétiques, à moins qu'il n'existe quelque part dans la roche des corps «perturbateurs» dont la susceptibilité est suffisamment importante pour générer des anomalies magnétiques. Ce cas est observé dans les calcaires jurassiens où les dépôts morainiques et éoliens remplissent fréquemment les fissures de la roche. Ces dépôts, qui contiennent de la magnétite et des débris de roches dont la susceptibilité magnétique est élevée, sont capables de fournir des distorsions du champ total et permettent ainsi une localisation indirecte des zones fissurées. Seul un échantillonnage en continu peut individualiser ces faibles anomalies. L'utilisation de magnétomètres perfectionnés, capables d'échantillonner plusieurs fois par seconde s'avère alors nécessaire pour effectuer des profils et des cartes magnétiques suffisamment détaillés.

L'équipement utilisé est un ENVIMAG, magnétomètre à proton de la Maison SCINTREX dont la résolution est de 0.1nT. L'instrument mesure le champ total et le gradient avec un intervalle d'échantillonnage à choix de 0.5, 1 ou 2 secondes.

3. Résultats

Dans la région de la Grotte de Milandre (Bure, canton du Jura) où nous disposons d'un site expérimental dans le karst tabulaire, la prospection électromagnétique RMT et VLF-EM,

ainsi que plusieurs forages de reconnaissance ont permis de localiser avec précision le passage d'une zone de fracture majeure dans les calcaires du Malm. Cet accident tectonique est également bien repéré par la prospection magnétique (MÜLLER et al., 1995). La fig. 1 présente l'un des nombreux profils E-W recoupant deux failles orientées N-S, l'une à environ 40m et l'autre à environ 170 m.

L'anomalie magnétique provient des remplissages quaternaires, surtout éoliens, qui infiltrent ces failles et dont la susceptibilité magnétique sur « cuttings » varie entre $K = 0.4$ à $0.7 \cdot 10E-3$.

La fig. 2 illustre par contre une zone peu fracturée dans la région du Creux du Van (canton de Neuchâtel). L'amplitude des faibles variations répétées du champ total ne dépasse pas les 2 à 3 nT, contrairement à ce qui est observé à la fig. 1 sur une zone de fracture majeure où les amplitudes varient entre 20-30nT.

Sur le calcaire crétacé du Valanginien ou «Marbre bâtard» du col du Marchairuz (canton de Vaud) à la fig. 3 et de Lignièrès (canton de Neuchâtel) à la fig. 4, les profils magnétiques mesurés présentent des variations resserrées en «dent de scie». L'examen des affleurements en ces endroits montre des dalles calcaires très fracturée et karstifiées. Le remplissage quaternaire de ces fractures semble produire des variations magnétiques importantes, dont les amplitudes et les fréquences, assez similaires sur les deux sites, pourrait être caractéristiques de cette formation du Jura suisse.

Afin d'écarter tout doute quant à la position de l'anomalie magnétique par rapport à celle des structures karstiques ou épikarstiques, il est utile de rappeler que le gradient magnétique (nT/m) est un indicateur précieux dans l'estimation de la proximité du «corps perturbateur». Les deux capteurs du magnétomètre, superposés et distants de 50 cm, mettent d'autant mieux en évidence ces corps qu'ils se trouvent à proximité, c'est à dire qu'ils se trouvent très proche de la surface du sol. En plus, ces mesures de gradient ne sont pas influencées par les changements rapides du champ total. Il est donc intéressant de constater à la fig. 4 que le gradient varie nettement sur les anomalies du Marbre indiquant bien que le remplissage détecté est superficiel.

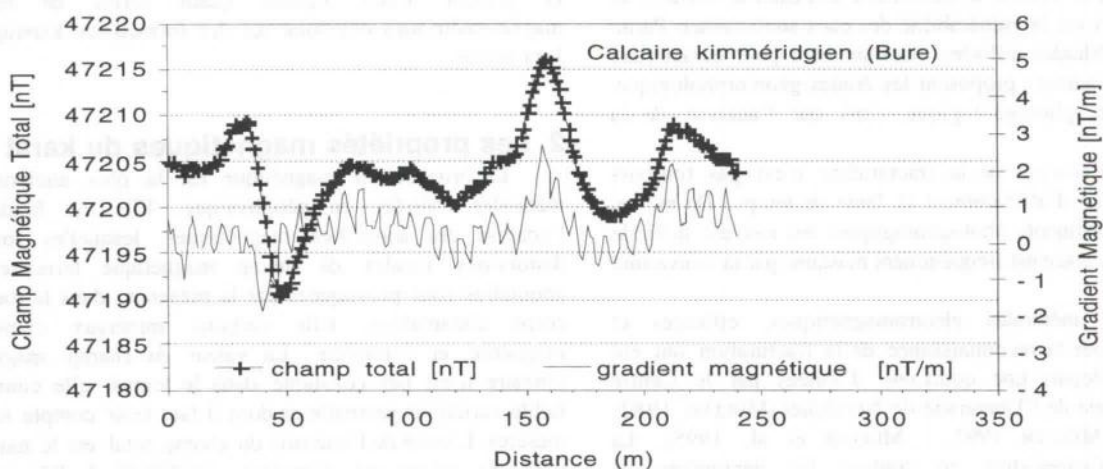


Fig. 1: Profil magnétique (champ total et gradient) sur une zone fracturée majeure du Kimméridgien (Bure, canton du Jura, Suisse).

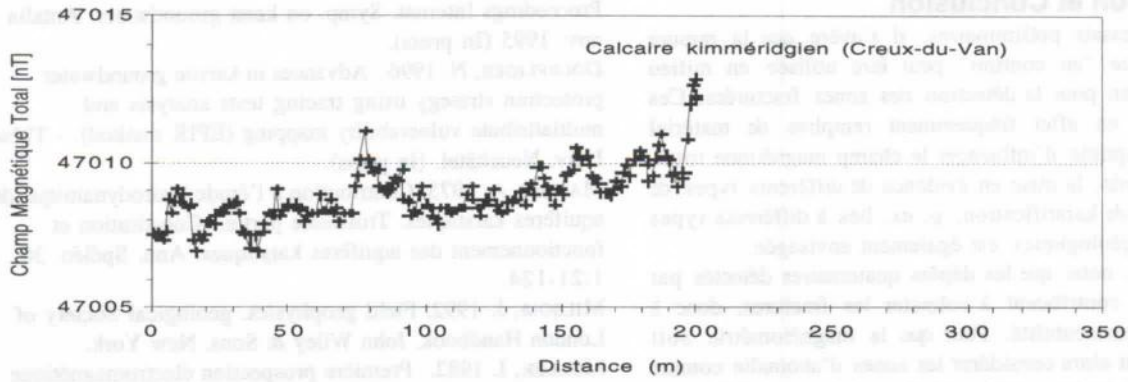


Fig. 2: Profil magnétique (champ total) sur une zone faiblement fracturée du Kimméridgien (Creux-du-Van, canton de Neuchâtel, Suisse).

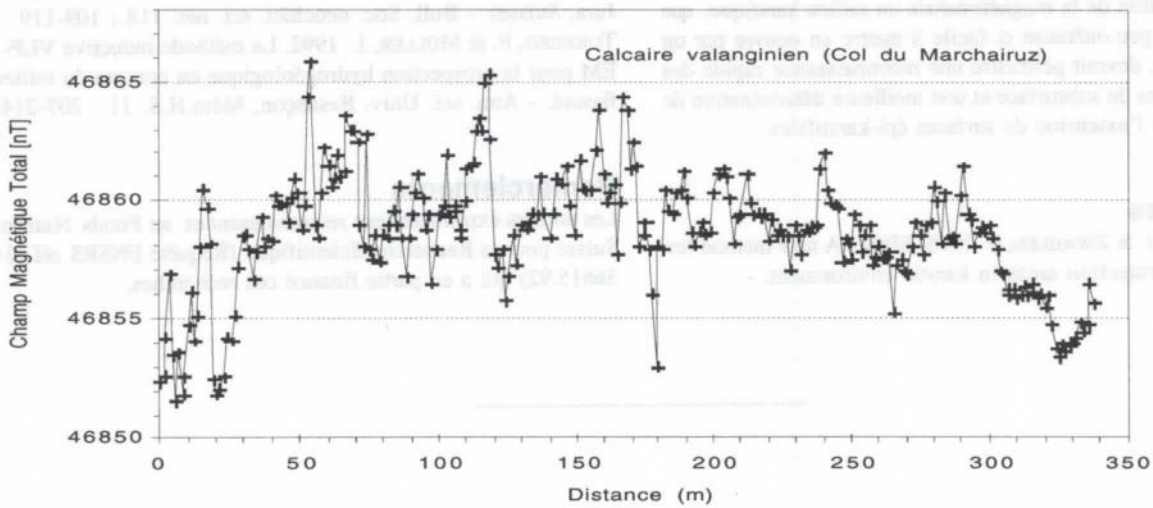


Fig. 3: Profil magnétique (champ total) sur une zone fracturée et karstifiée du Valanginien (Marchairuz, canton de Vaud, Suisse).

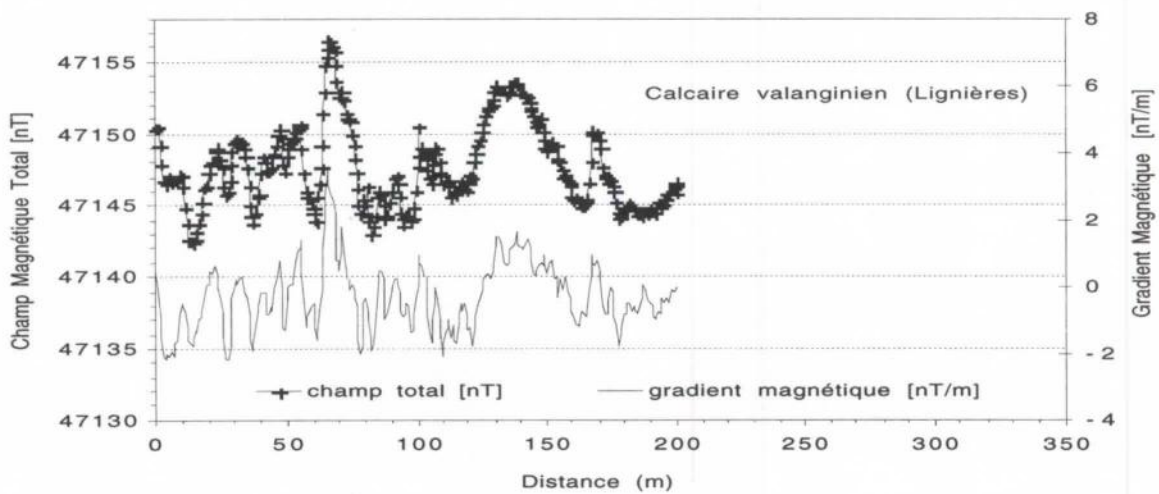


Fig. 4: Profil magnétique (champ total et gradient) sur une zone fracturée et karstifiée du Valanginien (Lignièrès, canton de Neuchâtel, Suisse).

4. Discussion et Conclusion

Sur la base d'essais préliminaires, il s'avère que la mesure magnétométrique "en continu" peut être utilisée en milieu calcaire jurassien pour la détection des zones fracturées. Ces dernières sont en effet fréquemment remplies de matériel détritique susceptible d'influencer le champ magnétique total. Par cette méthode, la mise en évidence de différents types de fracturation ou de karstification, p. ex. liés à différents types de formations géologiques, est également envisagée.

Il faut toutefois noter que les dépôts quaternaires détectés par magnétométrie contribuent à colmater les fractures, donc à diminuer leur perméabilité. Pour que la magnétométrie soit utilisable, il faut alors considérer les zones d'anomalie comme des zones d'altération préférentielle où la probabilité de trouver des volumes perméables est plus forte que dans les zones dépourvues d'anomalie magnétique. A l'heure actuelle, l'évaluation du degré de colmatage d'une zone fracturée reste encore hors de portée des méthodes géophysiques de surface.

Il nous apparaît néanmoins, après deux années d'expérience dans l'application de la magnétométrie au milieu karstique, que cette méthode peu onéreuse et facile à mettre en oeuvre par un seul opérateur, devrait permettre une reconnaissance rapide des zones fracturées de subsurface et une meilleure détermination de la nature et de l'extension de surfaces épi-karstifiées.

Références

DOERFLIGER, N. & ZWAHLEN, F. 1995. EPIK : A new method for outlining of protection areas in karstic environment. -

Proceedings Internat. Symp. on karst groundwater. Antalia nov. 1995 (In press).

DOERFLIGER, N. 1996. Advances in karstic groundwater protection strategy using tracing tests analysis and multiattribute vulnerability mapping (EPIK method). - Thèse Univ. Neuchâtel. (In press).

MANGIN, A. 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Troisième partie.- Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques. Ann. Spéléo. 30, 1:21-124.

MILSON, J. 1992. Field geophysics. geological Society of London Handbook. John Wiley & Sons. New York.

MÜLLER, I. 1982. Première prospection électromagnétique VLF (Very Low Frequency) dans le karst en Suisse. Actes Congr. nat. spéléol. 24-26 sept. 1982 Schwyz : 173-181.

MÜLLER, I. et al., 1995. Réflexions sur les résultats obtenus par l'enregistrement en continu des paramètres géophysiques, électromagnétiques (VLF-EM) et magnétiques, pour l'exploration des aquifères karstiques (Grotte de Milandre, Jura, Suisse). - Bull. Soc. neuchâtl. sci. nat. 118 : 109-119.

TURBERG, P. & MÜLLER, I. 1992. La méthode inductive VLF-EM pour la prospection hydrogéologique en continu du milieu fissuré. - Ann. sci. Univ. Besançon, Mém.H.S. 11 : 207-214.

Remerciements

Les auteurs expriment leur reconnaissances au Fonds National Suisse pour la Recherche Scientifique (Requête FNSRS réf. 21-36615.92) qui a en partie financé ces recherches.

Authors' Index

AAEMM	III	191	Borowsky Richard	III	359	Damyantov Y.	I	111
Abbate R.	II	205	Borsato Andrea	I	247	Damyantov Y.	I	105
Abdul-Nour Hani	III	35	Borsato Andrea	I	77	Damyantov Y.	I	107
Abul-Hab Jalil	III	369	Borsato Andrea	II	57	Damyantov Y.	I	110
Adank Markus	IV	65	Boutin Claude	III	350	Damyantova A.	I	110
Abdesselam Malek	II	247	Boyd Clifford C.	III	37	Damyantova A.	I	111
Aigoun C.	II	247	Brandt Cyrille	IV	71	Damyantova A.	I	105
Alimé Gérard	III	5	Brouquisse François	II	299	Damyantova A.	I	107
Allison Cara	I	16	Brouquisse François	II	61	Daoxian Yuan	I	300
Ancel Bruno	III	195	Brouquisse François	IV	47	Daoxian Yuan	II	123
Ancel Bruno	III	245	Buchas Holger	I	453	Day Michael J.	I	133
Ancel Bruno	III	249	Bulichov Anatoly	V	89	Day Michael J.	I	215
Andreev Sergiu P.	III	321	Bundschuh Jochen	II	129	de Bonis L.	I	424
Andreo B.	II	251	Burri Ezio	II	201	De Broyer C.	V	103
Arcenegui Rocio	I	183	Buzjak Nenad	III	301	De Paola Marco	I	202
Argant Alain	III	105	Calvet Jean-Paul	III	261	Décréau Frédéric	III	91
Argant Alain	III	160	Cañaveras J. C.	II	103	Deflandre G.	I	93
Arlt Thilo	III	203	Capellini Dante Terence	III	145	Deharveng Louis	IV	47
Arlt Thilo	III	253	Cappa Emanuele	III	9	Delaby Serge	IV	111
Arlt Thilo	III	257	Cappa Emanuele	IV	79	Delaby Serge	IV	115
Armand Dominique	III	109	Cappa Giulio	III	9	Delannoy Jean-Jacques	I	61
Arrigo Cyril	IV	13	Cappa Giulio	IV	79	Delannoy Jean-Jacques	II	69
Astruc J.-G.	I	424	Carlson Kent R.	III	347	Delannoy Jean-Jacques	I	257
Atteia Olivier	II	125	Carrasco F.	II	251	Dematteis Antonio	II	291
Atteia Olivier	II	141	Casati Luigi	IV	67	Denneborg Michael	I	341
Audra Philippe	I	165	Cassou Jean-Pierre	V	53	Denys Christiane	I	424
Audra Philippe	I	337	Castellani Vittorio	III	265	Denys Christiane	III	165
Audra Philippe	I	429	Castellani Vittorio	III	269	Denys Christiane	III	178
Auler A.	II	271	Cech Brigitte	III	209	Destombes Jean-Luc	I	257
Ayub Soraya	IV	45	Chabert Jacques	IV	83	Destombes Jean-Luc	II	69
Ayub Soraya	V	35	Chabert Jacques	V	111	Destombes Jean-Luc	I	61
Badescu Adrian	I	25	Changyun Zhang	IV	55	Dimuccio Luca Antonio	I	202
Badino Giovanni	I	483	Chauve Pierre	II	247	Dimuccio Luca Antonio	I	400
Bakalowicz Michel	II	23	Chazine Jean-Michel	III	101	Djurovic Predrag	I	421
Bakalowicz Michel	II	55	Choppy Jacques	I	3	Dodelin Christian	V	73
Balbi A.	I	69	Choppy Jacques	I	367	Doerfliger Nathalie	II	133
Balderer Werner	II	275	Choppy Jacques	I	401	Doerfliger Nathalie	II	209
Banton O.	II	283	Choppy Jacques	IV	83	Doerfliger Nathalie	II	47
Barczewski M.	II	55	Christe Romain	II	221	Dogwiler Toby	I	178
Barredo Silvia P.	I	69	Cigna Arrigo A.	I	203	Dominguez Carmen	I	485
Barsanti Cecilia M.	III	217	Cimino Antonio	II	205	Dragan-Bularda Mihail	III	285
Bartholeyns Jean-Pierre	V	103	Cinq-Mars J.	II	287	Dragoni Walter	III	265
Bärtschi Hans-Peter	III	233	Clarck I. D.	II	287	Draily Christelle	III	61
Bayle Christian	II	1	Clemens Torsten	I	301	Dreybrodt Wolfgang	II	75
Becker José Henrique	V	35	Clemens Torsten	II	107	Dreybrodt Wolfgang	II	81
Bedos Anne	IV	47	Clemens Torsten	II	65	Drouin Philippe	IV	119
Bella P.	I	85	Clemens Torsten	I	307	Drouin Philippe	III	113
Benderev Alexey	II	255	Closson Damien	V	13	Drysdale R. N.	I	73
Bengeanu Monica	I	235	Closson Damien	I	322	Du Fayet de la Tour Alain	III	79
Benischke Ralf	I	425	Clottes Jean	III	103	Dublyansky Yuri V.	II	267
Bernasconi Reno	III	333	Clottes Jean	III	4	Dublyansky Yuri V.	I	271
Bernasconi Reno	III	337	Coca Spencer	IV	87	Dubois Paul	I	3
Berstad Ida Malene	I	53	Codrea Vlad	III	179	Ducimetière Pascal	IV	13
Bini Alfredo	I	345	Coineau N.	III	350	Duday Henri	III	79
Bitinskaya L. N.	V	31	Collet Guy-Christian	III	83	Duffaud S.	I	424
Bitterli Thomas	IV	5	Collignon Bernard	II	263	Dumont Laurent	IV	13
Bitterli Thomas	I	349	Collignon Bernard	IV	57	Ehret Michel	III	221
Bixio Roberto	III	269	Cordonnier M.	II	69	Einevoll Sølvi	I	53
Bland J.	I	111	Cortel Adriano	I	183	Eisenlohr Laurent	II	81
Blinov S. M.	II	319	Cortel Adriano	I	179	Eiswirth Matthias	II	213
Blondel C.	I	424	Coste Thierry	V	85	Ek Camille	I	297
Bock Matthias	III	199	Cours Serge	III	79	Ek Camille	I	322
Bodin Jacques	II	259	Cox Nicholas J.	I	285	Ek Camille	V	13
Boehm Peter	III	203	Craven Stephen Adrian	V	15	Emblanch Christophe	II	17
Bohly Bernard	III	221	Crochet Jean-Yves	I	424	Emblanch Christophe	II	5
Bolanz Jean-Jacques	IV	75	Cruz C. M.	II	95	Engel Scott	I	21
Bolliger Thomas	III	141	Cruz de la A. V.	II	95	Epis Lorenzo	V	29
Bonacci Ognjen	II	27	Dalmeri Gianpaolo	I	77	Eraso Adolfo Romero	I	483

Eraso Adolfo Romero	I	485	Ginés Angel	I	37	Hückinghaus Dirk	II	107
Espinasa Luis	III	359	Ginés Joaquin	I	37	Hückinghaus Dirk	II	145
Eszterhás István	I	469	Glazek Jerzy	I	85	Hückinghaus Dirk	II	65
Faeh A.	II	9	Glazek Jerzy	I	405	Huff Warren	I	25
Fage Luc-Henry	III	101	Glazek Jerzy	I	45	Huggenberger Peter	II	221
Faillat Jean-Pierre	II	111	Glowacki Piotr	I	366	Huntoon Peter W.	I	311
Faillat Jean-Pierre	II	85	Gobrunova K. A.	II	319	Imper David	III	229
Fairchild Ian J.	I	247	Goggin Keith E.	I	381	Isayevitch A. G.	V	31
Fang Jinfu	I	395	Gogniat Stéphane	II	229	Jaillet Stéphane	I	171
Farina Daniele	I	143	Goldie Helen S.	I	285	Jalov Alexey	IV	25
Favre Gérard	IV	13	Goodbar James	V	3	Jambresic Gordana	III	157
Felici Alberta	IV	79	Grady Frederick	III	175	Jan Vit	I	45
Felici Alberto	III	9	Gradzinski Michal	I	275	Jeanbourquin Pascal	II	13
Felisiak Ireneusz	I	17	Gradzinski Michal	I	81	Jeannin Pierre-Yves	I	195
Ferguson Lynn M.	III	315	Gradzinski Michal	I	85	Jeannin Pierre-Yves	II	149
Fernandez-Jalvo Yolanda	III	165	Gradzinski Michal	IV	91	Jeannin Pierre-Yves	II	91
Fiedler Suzana	III	301	Grandgirard Vincent	I	331	Jeannin Pierre-Yves	IV	1
Filippov Andrey G.	I	465	Grasso Alessandro D.	II	91	Jeannin Pierre-Yves	I	293
Fischer M. J.	I	73	Guadelli Jean-Luc	III	117	Jeannin Pierre-Yves	I	349
Fluck Pierre	III	187	Guardiaro J. D. A.	II	199	Jifang Shen	IV	55
Foltete Jacques	I	169	Guglielmi Yves	II	137	Johnson Jerald	III	41
Font Estramar, Ass. Rech.	IV	71	Guyot Jean Loup	IV	51	Jonsson Sigurdur S.	I	485
Ford Derek C.	I	44	Guyot Jean-Loup	II	271	Jordan P.	II	275
Ford Derek C.	I	88	Guzvica Goran	III	121	Jordi Martin	V	77
Ford Derek C.	II	120	Habermann Dirk	I	251	Jull Timothy A. J.	I	65
Ford Derek C.	II	195	Halliday William R.	I	437	Junwei Wan	IV	55
Ford Derek C.	I	105	Halliday William R.	I	199	Kadlec Jaroslav	I	13
Ford Derek C.	I	107	Halliday William R.	I	461	Kadlec Jaroslav	I	387
Ford Derek C.	I	111	Hanneberg Armin	III	203	Kalmbach Uwe	IV	29
Ford Derek C.	I	146	Hanneberg Armin	III	253	Karlén W.	I	55
Ford Derek C.	I	261	Hanneberg Armin	III	257	Kashima Naruhiko	III	281
Ford Derek C.	I	262	Hapka Roman	III	3	KäB Werner	II	187
Forgeot Olivier	I	9	Hapka Roman	III	57	KäB Werner	II	55
Fornos Joan J.	I	37	Harlacher Christof	I	307	Kawashti I. S.	III	371
Forti Paolo	I	187	Hartenberger J.-L.	I	424	Kejonen Aimo	III	53
Forti Paolo	I	226	Hartmann A.	II	239	Kejonen Aimo	IV	93
Fosse Philippe	III	149	Hartmann Jens	I	100	Kempe Stephan	I	100
Fratila Gheorghe	III	179	Hartmann Jens	I	453	Kempe Stephan	I	453
Fratila Gheorghe	I	231	Hassan H. A.	III	371	Kempe Stephan	III	13
Frisia Silvia	I	247	Hauns Michael	II	141	Kempe Stephan	I	445
Frisia Silvia	I	77	Häuselmann Philipp	II	31	Kempe Stephan	I	449
Frumkin Amos	I	139	Häuselmann Philipp	IV	1	Keppens E.	I	93
Fuchs Gerald	I	425	Havlicek David	I	481	Ketz-Kempe Christhild	III	13
Funcken Luc	III	205	Heaton Tim	I	77	Kicinska Ditta	I	168
Funcken Luc	IV	7	Heijnis H.	I	73	Kienle J.	II	163
Funcken Luc	IV	9	Heller Martin	V	127	Kiss Stefan	III	285
Furquim Scaleante Oscarlina A.	I	363	Hercman Helena	I	45	Klimchouk Alexander	I	157
Gaál Lúdvít	I	464	Hercman Helena	I	85	Klimchouk Alexander	I	161
Gabrovsek Franci	IV	23	Hercman Helena	I	87	Klimchouk Alexander	I	306
Gadat J.-Y.	II	69	Hermann Felix	II	141	Knez Martin	II	279
Gaiffe M.	I	297	Herold Thilo	II	275	Knez Martin	I	156
Galdenzi Sandro	I	187	Hill Carol A.	I	226	Korshunov Viktor A.	I	29
Gale S. J.	I	73	Hill Carol A.	I	390	Korzhyk Vitali	V	7
Galik Alfred	III	65	Hobbs III H. H.	III	345	Kósa Attila	V	129
Gallerini Giuliano	I	143	Hobléa Fabien	II	35	Kosel Vladimir	III	310
Garasic Mladen	IV	123	Hobléa Fabien	I	429	Kostov Konstantin	I	409
Garasic Mladen	IV	125	Hof Alex	I	137	Kovacevic Tihomir	IV	125
Garasic Mladen	I	147	Hofenpradli Angelica	I	235	Krasnoshtein Arkady E.	V	31
Garcia A. E.	II	95	Hoffmann Guido	V	65	Krawczyk Wieslawa Ewa	I	493
Garcia Michel	III	79	Holland Ernst	V	39	Krekeler Mark P. S.	I	21
Gaspar E.	I	41	Holler Cato Jr.	III	305	Krklec Nevenka	III	157
Gaspar Radu D.	II	175	Holmgren K.	I	55	Krouse Roy H. P.	I	105
Gaspar Radu D.	II	217	Holsinger John R.	III	347	Krouse Roy H. P.	I	107
Genereux D.	II	199	Horat Peter	II	9	Krouse Roy H. P.	I	65
Genty Dominique	I	61	Hoti Makir	IV	129	Krutaj Farudin	IV	129
Genty Dominique	I	257	Hötzl Heinz	II	187	Kusch Heinrich	III	17
Georgiev L. N.	I	105	Hötzl Heinz	II	213	Labau V.	I	41
Georgiev L. N.	I	107	Hötzl Heinz	II	303	Laconas Erikas	III	169
Ghargari Lucretia	I	231	Hoyos M.	II	103	Lami H.	II	247
Ghargari Lucretia	I	227	Huang Yiming	I	77	Larocque Marie	II	283
Giannandrea Paolo	I	202	Hubbard David	III	37	Lascu Cristian	I	25
Gietl Diana	I	497	Hubbard David	III	175	Lastennet Roland	II	17
Gillieson David	I	327	Hubbard David A. Jr.	III	311	Lastennet Roland	II	5

Laudet Frédéric	I	424	Masotti Daniel	V	9	Oelze Rainer	I	251
Laudet Frédéric	III	165	Massoli-Novelli R.	II	201	Onac Bogdan Petroniu	I	235
Laudet Frédéric	III	178	Matthews Peter	V	72	Onac Bogdan Petroniu	I	227
Laureti Lamberto	III	236	Matthews Peter	V	72	Onac Bogdan Petroniu	I	231
Lauriol Bernard	II	287	Matthews Peter	V	72	Orecchio S.	II	205
Lauritzen Stein-Erik	I	178	Maucha Laszlo	II	157	Otonicar Bojan	I	417
Lauritzen Stein-Erik	I	45	Maucha Laszlo	II	321	Otz Martin	II	31
Lauritzen Stein-Erik	I	55	Mauduit Eric	III	261	Paar Werner	III	209
Lauritzen Stein-Erik	I	57	Mavlyudov Bulat R.	I	191	Pacher Martina	III	65
Lauritzen Stein-Erik	I	85	Maximovich N. G.	II	319	Pajón Morejon Jesús M.	I	97
Lauritzen Stein-Erik	II	320	McDermott Frank	I	77	Pajón-morejón Jesús M.	II	95
Lauritzen Stein-Erik	I	49	Mecchia Marco	I	483	Pandurska Rumiana	III	367
Lauritzen Stein-Erik	I	53	Medville Douglas M.	I	381	Partridge T. C.	I	55
Le Bec G.	II	111	Medville Douglas M.	I	457	Pascu Maria	II	175
Le Penne Robert	II	39	Medville Hazel E.	I	457	Pashenko Serguei E.	I	271
Lee-Thorp J.	I	55	Meier Edi	II	221	Patrick Rosenthal	III	225
Leel-Ossy Szabolcs	I	116	Melloul Abraham J.	II	225	Paunica I.	III	217
Legendre S.	I	424	Melo Filho Leonildes	IV	51	Paunica T.	I	41
Lesinsky Gabriel	III	325	Melo-Filho Leonildes	II	271	Pavuzu Rudolf	I	7
Leszkiewicz Jan	I	489	Menichetti Marco	I	187	Pechhold Eberhard	I	211
Lewandowski Klaus	III	213	Menne Benjamin	II	119	Pedde Sara	III	67
Lhenaff R.	I	297	Menne Benjamin	IV	33	Perego Renata	III	124
Li Juzhang	I	395	Menne Benjamin	III	289	Perego Renata	III	136
Liedl Rudolf	II	107	Messouli M.	III	350	Perna Giuliano	I	397
Liedl Rudolf	II	145	Meus Philippe	II	55	Perret Catherine	IV	65
Liedl Rudolf	II	153	Michel G.	V	103	Perret Jean François	IV	51
Liedl Rudolf	II	65	Michel J.	V	81	Perrette Yves	I	257
Liedl Rudolf	I	195	Michel Raymond	V	13	Perrette Yves	I	61
Liessmann Wilfried	III	237	Michie Neville	V	43	Perrin Jérôme	II	99
Lignereux Yves	III	71	Middleton Gregory	I	437	Perrin Jérôme	IV	19
Lin Junshu	I	395	Mihevc Andrej	I	57	Petitta Marco	II	201
Linge Henriette	I	49	Mijatovic Borivoje F.	II	295	Petrochilou Anna	III	64
Lips Bernard	IV	41	Miserez Jean-Jacques	II	229	Philippe Michel	III	113
Liu Zaihua	I	300	Mixon David	I	21	Philippe Michel	III	125
Liyanyun X. C. C.	I	21	Mohrlok Ulf	II	163	Philippe Michel	III	136
Ljubojevic Vladimir	I	421	Mohrlok Ulf	II	167	Philippe Michel	III	161
Lochner Bernd	III	241	Moldovan Oana	III	319	Pinto Ana Cristina	III	171
Loiseleur Bernard	I	355	Montandon Paul-Etienne	II	229	Plagnes Valérie	II	179
Loiseleur Bernard	I	441	Montero Garcia Ismael Arturo	III	20	Plesa Corneliu	III	329
Longinelli Antonio	I	247	Montero Garcia Ismael Arturo	V	80	Porter Megan L.	III	345
Looser Michel	II	291	Morel Laurent	V	99	Postawa A.	II	235
López-Chicano M.	II	43	Morel Philippe	III	3	Preiswerk Christian	IV	37
Lowe David J.	I	436	Morel Philippe	III	137	Prokhorenko Vitaliy	V	93
Lozan Mina N.	III	321	Morin Denis	III	225	Prokhorenko Vitaliy	V	95
Lundberg Joyce	I	178	Motyka Jacek	II	171	Proudlove Graham S.	III	351
Lundberg Joyce	I	101	Motyka Jacek	II	235	Proudlove Graham S.	III	355
Macaluso M.	II	205	Mouret Claude	II	299	Puech Vincent	I	293
MacDonald William D.	I	105	Mouret Claude	IV	57	Puig J. M.	II	5
MacDonald William D.	I	107	Mouret Claude	III	363	Pulido-Bosch Antonio	II	43
MacDonald William D.	I	60	Mousny Vincent	V	13	Pulina Marian	I	323
Madry B.	II	81	Mudry Jacques	II	137	Pulina Marian	I	366
Magniez Guy J.	III	341	Mudry Jacques	II	17	Pulina Marian	I	489
Maire Richard	I	359	Mudry Jacques	II	247	Pulina Marian	I	493
Maltsev Vladimir A.	I	29	Mudry Jacques	II	251	Quinif Yves	I	93
Maltsev Vladimir A.	I	219	Mudry Jacques	II	5	Quinif Yves	I	257
Maltsev Vladimir A.	I	267	Mueller Robert J.	I	215	Quinif Yves	I	61
Mangan C.	II	137	Muglova Penka	III	95	Radanovic-Guzvica Biserka	III	121
Mangin Alain	II	283	Muglova Penka	I	207	Rage J.-C.	I	424
Mania Jacky	II	247	Mulaomerovic Jasminko	III	87	Ragsdale Michael	I	21
Manolache Elena	III	285	Müller Claudia	I	301	Rathgeber Thomas	III	153
Marandat B.	I	424	Müller Elisabeth	II	239	Ravazzi Cesare	III	124
Maréchal Jean-Christophe	II	149	Müller Imre	II	221	Razack M.	II	259
Maréchal Jean-Christophe	II	291	Müller Imre	II	243	Razack M.	II	283
Marinova E.	I	107	Muñoz Alfonso	I	179	Ré G.	I	69
Martin Philippe	I	129	Munson Cheryl Ann	III	45	Redonte Gabriel Jorge	IV	99
Martin Rosales W.	II	43	Munson Patrick J.	III	45	Rehák Josef	I	493
Martinek Klaus-Peter	III	253	Mylroie John E.	I	178	Reichert Barbara	II	303
Martinek Klaus-Peter	III	257	Naef F.	II	9	Reiner Gerhard	III	181
Martini Jacques E.J.	I	223	Niggemann Stefan	I	251	Reisinger Christian	III	129
Martini Sergio	III	217	Niggemann Stefan	I	151	Reisner Victor	IV	103
Martini Sergio	I	315	Nini Roberto	III	273	Remy J.-A.	I	424
Masotti Daniel	V	21	Oberwinder Matthias	I	453	Renner Sven	II	153
Masotti Daniel	V	25	Oberwinder Matthias	I	449	Reynard Emmanuel	V	17

Reynaud A.	II	137	Sigé B.	I	424	Vacquié Jean-François	IV	57
Richter Detlev K.	I	251	Simões Washington	III	83	Vadillo I.	II	251
Rigal Didier	IV	47	Simon-Coinçon R.	I	424	Valdés J. J.	II	95
Rogers Bruce W.	III	45	Singh Ramesh B.	I	369	Vallejos A.	II	43
Rognon P.	II	229	Slabe Tadej	I	377	van Beyden P. E.	II	120
Rosendahl Wilfried	III	25	Smart Chris C.	II	183	Van Beynen P. E.	I	262
Rospondek Mariusz	I	81	Smart Chris C.	II	315	Vanara Nathalie	II	115
Rossi Carlos	I	179	Smart Chris C.	II	51	Vanara Nathalie	I	359
Rossi Carlos	I	183	Smart Peter L.	I	16	Vasileva Danica	I	175
Russet Claude	II	307	Smyk Boleslaw	I	275	Vasiliev Andrey G.	III	321
Rouvinez Fabienne	III	57	Soler V.	II	103	Vendramini Guilherme	IV	51
Rouzaud François	III	261	Somelette Luc	II	111	Veni George	I	373
Rouzaud François	III	49	Song Linhua	I	279	Verheyden Sophie	I	93
Rouzaud François	III	71	Song Linhua	I	319	Verheyden Sophie	IV	111
Rouzaud François	III	79	Song Linhua	I	433	Verheyden Sophie	IV	115
Rouzaud François	III	97	Souillac, Spéléo-Club de	III	161	Versa Dorotea	V	69
Rouzaud François	III	91	Soulier Michel	III	71	Vianey-Liaud M.	I	424
Rouzaud Jean-Noël	III	91	Spahlinger Wolf	IV	29	Viehmänn Iosif	I	227
Rowling Jill	I	263	Spicher Michel	I	331	Viehmänn Iosif	III	133
Rozkowski Jacek	I	323	Spiro Baruch	I	77	Vremir Matei	I	413
Rubbioli Ezio	IV	51	Stibrányi Gustáv	V	119	Wan Junwei Y.	II	21
Ruggieri Rosario	IV	61	Stichler W.	II	303	Wang Daqing	III	311
Ruggieri Rosario	I	125	Stiefelhagen Willy	II	221	Wang Fuchang	I	433
Saiers J. E.	II	199	Stoiev Alexey	I	207	Watson Patty Jo	III	29
Salvatori Francesco	V	107	Stoiev Alexey	III	95	Weber Dieter	III	307
Salvatori Francesco	V	115	Stoiev Dimitar	I	207	Weidmann Yvo	IV	37
Salvatori Francesco	V	117	Stoieva Mina	III	95	Weidmann Yvo	IV	65
Sanchez-Moral S.	II	103	Strassenburg Jan	I	453	Weisgerber Gerd	III	216
Sanz-Rubio E.	II	103	Striebel Thomas	I	473	Weissensteiner Volker	I	425
Sarbu Serban	I	25	Stroutchkova Tatiana	III	78	Werner Andreas	II	187
Sasowsky Ira	I	25	Stuart-Williams Hilary	I	88	White Elisabeth L.	II	191
Sauter Martin	II	107	Sudre J.	I	424	White Elizabeth L.	I	155
Sauter Martin	II	145	Summers Engel Annette	I	21	White Elizabeth L.	I	305
Sauter Martin	II	153	Summers Engel Annette	I	25	White William B.	II	191
Sauter Martin	II	167	Sustersic France	I	117	White William B.	I	155
Sauter Martin	II	65	Swinburne Nicola	I	88	White William B.	I	305
Sauter Martin	I	195	Szulc Joachim	I	275	White William B.	I	89
Sauter Martin	I	301	Szulc Joachim	I	81	Wilcock John D.	V	61
Sauter Martin	I	307	Tacchini Pascal	IV	19	Willems Luc	I	477
Sauter Martin	I	318	Tamas Tudor	I	413	Williams Paul W.	I	92
Sbai Abdelkader	I	297	Tankersley Kenneth B.	III	75	Wollman S.	II	225
Sbai Abdelkader	II	311	Tankersley Kenneth B.	III	45	Wolniewicz Klaus	I	453
Schäferjohann Volker	I	473	Tarhule-Lips Rozemarijn F. A.	I	146	Wookey	V	57
Scherrer Nadim C.	I	73	Tarhule-Lips Rozemarijn F. A.	I	261	Worthington Stephen R. H.	II	195
Scherrer S.	II	9	Tasler R.	I	481	Wutzig B.	III	277
Schifferdecker François	III	137	Terlau Craig A.	I	133	Xiyang Xiao	IV	55
Schmid G.	II	55	Teutsch Georg	II	163	Xuewen Zhu	II	121
Schnegg Pierre-André	II	47	Teutsch Georg	II	65	Yaseen Ahmed E.	III	371
Schöne Tilo	III	277	Thys G.	V	103	Yonge Charles J.	I	107
Schwarz Henry P.	I	88	Tognini Paola	I	345	Yonge Charles J.	I	111
Schwarz Henry P.	II	120	Tomova Bisera	V	131	Yonge Charles J.	I	436
Schwarz Henry P.	I	262	Toth V. A.	II	120	Yonge Charles J.	I	65
Scott Jane	I	436	Toussaint Michel	III	21	Yonge Charles J.	I	105
Sebela Stanka	I	113	Tremblay Marc	I	497	Yonge Charles J.	I	60
Seiler Klaus-P.	II	239	Trimborn P.	II	303	Zabo L.	II	51
Semikolennykh Andrei A.	I	29	Trofimova Elena	I	391	Zaenker Stefan	III	307
Semikolennykh Andrey A.	V	87	Tsankov Ludmil T.	I	105	Zambo Laszlo	I	44
Semikolennykh Andrey A.	III	293	Tsankov Ludmil T.	I	107	Zechner Eric	II	199
Shanov Stefan	II	255	Tsankov Ludmil T.	I	110	Zhao Jingbo	I	300
Shanov Stefan	III	367	Tsankov Ludmil T.	I	111	Zhaohui Zhang	III	297
Shaw D. Patrick	III	347	Tsankov Ludmil T.	I	65	Zhu Xuewen	I	385
Shaw P. A.	I	55	Tuccimei Paola	I	37	Zhu Yuanfeng	V	47
Shelepin Aleksey	IV	103	Tulis Ján	IV	107	Zuber A.	II	171
Shen Jifang	II	21	Turberg Pascal	II	243	Zuccoli Luisa	I	345
Shopov Yavor Y.	I	105	Turchinov Igor	I	121	Zupan Hajna Nadja	I	33
Shopov Yavor Y.	I	107	Turchinov Igor	I	239	Zurbrugg Ch.	II	9
Shopov Yavor Y.	I	110	Tyc Andrzej	I	289	Zwahlen François	II	209
Shopov Yavor Y.	I	111	Tyc Andrzej	I	323			
Shopov Yavor Y.	I	65	Tyson P. D.	I	55			
Shopov Yavor Y.	I	103	Tysseiland Magne	I	235			
Shrivastava V. K.	III	31	Uhrin Marcel	III	325			
Siebenlist-Kerner V.	III	203	Urbani Franco	I	243			
Siemens H.	II	75	Usuloglu Ender	V	123			



Réseau de Covatannaz, VD, Switzerland (Photo Rémy Wenger)



Barrazine: l'entrée lors d'une crue, France (Photo Pali Berg/Urs Widmer)



Source du Doubs, France (Photo Oliver Trueb)



Blautopf, Blaubeuren, Germany (Photo Pali Berg)