Gestion durable de l'environnement karstique

Actes de la réunion annuelle de la Société Suisse de Géomorphologie (SSGm)
La Chaux-de-Fonds, 3-4 septembre 2004

IUKB
INSTITUT UNIVERSITAIRE KURT BÖSCH

Editeur : Ralph Lugon

Sion, janvier 2006

Depuis toujours, les paysages calcaires superficiels et souterrains ont fasciné et stimulé l'imaginaire de l'homme. Le karst est un milieu sensible et particulier qui impose des contraintes de gestion spécifiques dans tous les domaines environnementaux: protection des eaux, conservation des sites, problèmes de pollution, valeur patrimoniale, biodiversité, etc. En outre, ce milieu pose des problèmes particuliers lors de travaux de génie civil, d'aménagement du territoire ou de développement touristique. Ce livre souhaite apporter des éléments de réflexion sur ces aspects appliqués de la gestion durable des pays calcaires.

SCHWEIZERISCHE
GEOMORPHOLOGISCHE
GESELLSCHAFT

SOCIÉTÉ SUISSE DE
GÉOMORPHOLOGIE

sc | nat

Member of
the Swiss Academy of Sciences

Edition
Institut universitaire Kurt Bösch, janvier 2006

Impression
Copy Centre Sprint Copy, 1950 Sion

Tirage
350 exemplaires

Photos de couverture
1ère de couverture : Quelques aspects de la richesse naturelle du milieu karstique (photos de Rémy Wenger et P.X. Meury).

4ème de couverture : Découverte ludique des formes de dissolution par une classe d'école primaire : sentier thématique du Margériaz, Parc Naturel Régional du Massif des Bauges (photo de Fabien Hobléa).

La publication de cet ouvrage a bénéficié d'un soutien financier apprécié de la part de :

l'Académie suisse des sciences naturelles (scnat)
l'Institut universitaire Kurt Bösch (IUKB), Sion

Table des matières

REMERCIEMENTS

PREFACE

Le développement durable du milieu karstique, problèmes et atouts,
Pierre-Yves Jeannin 11

L'expertise et la médiation scientifique : des outils pour la gestion durable de l'environnement karstique. Quelques pistes de réflexion développées au laboratoire Edytem,
Fabien Hobléa 25

La gestion durable de l'environnement karstique à travers l'activité touristique : le cas des grottes touristiques en France,
Vincent Biot 43

Utilisation touristique de cavités karstiques dans les roches évaporitiques : le cas du Valais central (Suisse),
Jean-Pierre Pralong 57

Valorisation géotouristique du karst de Tsanfleuron (Valais, Suisse),
Emmanuel Reynard 71

Changement climatique et gestion durable de l'approvisionnement en eau potable d'une région karstique : la vallée de Joux (Vaud, Suisse),
Géraldine Bissig 83

Hydrographie et géomorphologie karstique de la zone frontalière du département du Doubs (France) et du canton du Jura (Suisse),
Jean-Claude Bouvier : 97

sc | nat

Swiss Academy of Sciences
Akademie der Naturwissenschaften
Accademia di scienze naturali
Académie des sciences naturelles

SCHWEIZERISCHE GEOMORPHOLOGISCHE GESELLSCHAFT

SOCIÉTÉ SUISSE DE GÉOMORPHOLOGIE

Remerciements

Cet ouvrage constitue les Actes du colloque *Gestion durable de l'environnement karstique*, organisé à La Chaux-de-Fonds du 3 au 4 septembre 2004. Il est le fruit d'un travail collectif ayant impliqué la participation de nombreuses personnes et institutions, que nous tenons à remercier vivement :

Le comité de la **Société Suisse de Géomorphologie (SSGm)** nous a accordé son entière confiance pour l'organisation du colloque *Gestion durable de l'environnement karstique* et pour la publication de ces actes. Par le biais des subventions accordées par l'Académie suisse des sciences naturelles (Scnat), la société a également apporté un soutien financier substantiel à cette publication ;

L'Institut suisse de spéléologie et de karstologie (ISSKA) a officié comme relais local à La Chaux-de-Fonds. L'équipe de l'ISSKA a réglé de nombreux problèmes d'organisation. Elle s'est également chargée de l'organisation de l'excursion dans la région de La Chaux-de-Fonds ;

Pierre-Yves Jeannin, directeur de l'ISSKA, nous a conseillé pour l'organisation scientifique du colloque et nous a fait profiter de son réseau de relations dans le domaine du karst et de la spéléologie ;

L'Institut universitaire Kurt Bösch (IUKB) a apporté un soutien financier substantiel à cette publication ;

Mmes **Dolorès Rey** de l'IUKB et **Constanze Bonardo** de l'ISSKA se sont chargées de multiples détails organisationnels ;

M. **Sébastien Rotzer** de l'ISSKA a assuré avec brio l'organisation technique de la manifestation.

La publication de ces actes a par ailleurs bénéficié de la relecture critique des articles par les personnes suivantes : Pierre-Yves Jeannin, Marc Luetscher, Jean-Pierre Pralong, Ralph Lugon, Emmanuel Reynard.

Ralph Lugon, organisateur du colloque

IUKB
INSTITUT UNIVERSITAIRE KURT BÖSCH

SISKA / ISSKA

Préface

Organisé sous la houlette de Ralph Lugon, de l'Institut universitaire Kurt Bösch (IUKB) et accueilli à la Chaux de Fonds par l'Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie (ISSKA) dirigé par Pierre-Yves Jeannin, ce colloque a réuni une cinquantaine de chercheurs, étudiants, gestionnaires et experts issus de disciplines variées (biologie, paléontologie, hydrogéologie, géologie, géomorphologie, géographie humaine…). Cette diversité est révélatrice de l'intérêt et de l'actualité de la thématique de la gestion durable appliquée à un milieu, le karst, largement présent et concerné dans le Jura suisse. En effet, ce dernier est fortement peuplé et son dynamisme économique se traduit par de nombreux aménagements et grands chantiers en cours alors même qu'émerge, grâce notamment à de récentes et retentissantes découvertes paléontologiques, une conscience publique et politique du patrimoine « géotopique » de cette région.

Dans ce contexte, les exposés de la première matinée, faits par des conférenciers invités, ont pris tout leur relief, consacrés fort pertinemment à la problématique de la gestion durable du karst (P.Y. Jeannin), à l'hydrobiologie karstique (P.E. Montandon et F. Straub) et à la notion de géotopes appliquée au karst (M. Monbaron, L. Gogniat). Quelques idées fortes peuvent être dégagées de ces exposés :

Pour P.Y. Jeannin, les connaissances nécessaires à la protection du milieu karstique sont les mêmes que celles utiles au développement reposant sur l'utilisation de ses ressources propres (eau, matériaux rocheux, paysages) : ce constat devrait faciliter le couplage des deux démarches.

Les hydrobiologistes de la Chaux de Fonds ont montré le pouvoir étonnamment autoépurateur du milieu karstique souterrain en comparant l'efficacité épuratrice du cours aérien et souterrain de la Ronde durant l'été 2002. Le cours souterrain a ainsi montré une capacité épuratrice de 30% / km pour l'ammoniac et 10% / km pour le carbone organique. Cela permet d'avancer une hypothèse quant à la structure et la morphologie du lit de la Ronde souterraine, non pénétrable et inconnu : il s'agirait d'un écoulement vadose sur lit rocheux à biofilm (périphyton non algaire largement développé sur une vaste surface).

Les géomorphologues ont présenté la méthodologie de l'inventaire des géotopes du canton du Jura et son intégration dans la politique de développement durable du territoire, suite à une prise de conscience citoyenne et politique favorisée par une série de découvertes paléontologiques médiatisées dans les années 90. L'inventaire détermine la valeur patrimoniale des géotopes à partir d'un référentiel multicritères, et sert non seulement à la protection/conservation, mais également à la valorisation des sites (ex. de la piste des Dinosaures en Ajoie, qui reçoit 14 000 visiteurs par an, dont 1000 scientifiques, et qui constitue l'élément-clef d'un projet de Géoparc dans le secteur).

L'après-midi était réservée à une « open-session » pour une quinzaine de communications de la part de participants suisses et français, présentant des exemples localisés dans les domaines de l'usage géotouristique des sites

karstiques, de la gestion des ressources en eau karstique confrontée au changement climatique, de l'impact des grands chantiers (autoroutiers notamment) sur les géotopes karstiques. La place des scientifiques du karst dans les procédures de gestion et de valorisation a été au centre des débats.

Cette première journée s'est terminée par l'Assemblée Générale de la Société Suisse de Géomorphologie, tandis qu'un groupe de participants s'est retrouvé le lendemain pour une excursion consacrée au paysage karstique et eaux souterraines des alentours de la Chaux de Fonds (des Emposieux des Anciens Moulins jusqu'au Doubs).

Ce colloque a permis une fois encore d'apprécier la vitalité et l'esprit pionnier de la karstologie suisse, au contact toujours aussi convivial que scientifiquement enrichissant.

Fabien Hobléa
Laboratoire EDYTEM
Centre Interdisciplinaire Scientifique de la Montagne
Université de Savoie. France.

Le développement durable du milieu karstique, problèmes et atouts

Pierre-Yves JEANNIN,
Institut suisse de spéléologie et de karstologie (ISSKA), case postale 818, 2301 La Chaux-de-Fonds,
pierre-yves.jeannin@isska.ch

Résumé

L'environnement karstique est encore relativement mal connu, ce qui pose un problème tant pour sa protection que pour son développement (tourisme, urbanisme, voies de communications, etc.). Cet article tente de montrer que l'accroissement de nos connaissances générales et locales du milieu karstique est un facteur favorisant conjointement la protection du milieu et le développement des activités humaines. Après quelques considérations générales, l'article présente brièvement quelques bonnes raisons de protéger le milieu karstique, mais aussi de développer certaines utilisations. Trois exemples sont ensuite présentés pour illustrer la notion de développement durable en milieu karstique. Le premier exemple touche aux zones de protection des eaux souterraines (méthode EPIK), le deuxième exemple à la construction d'une autoroute à proximité immédiate d'une grotte reconnue d'importance nationale (Milandre, JU), et le troisième exemple au problème de la construction de tunnels en milieu karstique.

Abstract

Karst environment is still quite poorly known, what is often problematic for its protection as well as for its development (tourism, urbanism, roads, etc.). This short paper attempts to demonstrate that increasing our general and local knowledge of karst will benefit both for better protect karst and for better develop human activities in this environment. After an introduction the author briefly presents some good reasons to protect karst environment, but also to develop some utilisation of it. Three examples are presented in order to illustrate the concept of sustainable development in karst areas. The first example deals with groundwater protection zones (EPIK method), the second example presents a freeway construction close to a well decorated stream cave (Milandre, JU), and the third example talk about tunnel construction in karst.

1. Introduction et rappels

1.1 Objectifs

Le concept de développement durable a été propagé par le rapport *Notre avenir à tous* de la Commission des Nations Unies sur l'environnement et le développement (Rapport Brundtland) en 1987 (CMED 1988). Cette formule vise à réconcilier le développement économique et social, la protection de l'environnement et la conservation des ressources naturelles. Ce concept s'applique avec plus ou moins de facilité selon les contextes économiques, sociaux et environnementaux. De manière un peu schématique, le bien-être social peut être considéré comme étant le résultat d'un équilibre entre le bon fonctionnement de l'économie et la conservation d'un environnement agréable, favorisant une bonne qualité de vie. C'est donc sur cette opposition entre développement économique et conservation de l'environnement que reposent les conditions de base nécessaires à l'application du concept de développement durable.

Au travers de cette note, nous allons essayer d'esquisser quelques pistes permettant de situer les points d'opposition spécifiques au milieu karstique entre développement et conservation de l'environnement. Nous verrons également que pour certains aspects ces deux notions rivales peuvent converger vers un intérêt commun.

1.2 Le karst et ses spécificités

Le milieu karstique est caractérisé par une série de particularités géomorphologiques et hydrologiques (voir par exemple Ford et Williams, 1989) conditionnant l'implantation végétale et donc animale.

Les particularités géomorphologiques principales sont résumées sur la figure 1 (adapté de Jeannin et al., 2001). Les lapiés, dolines, bassins fermés, grottes, gouffres, pertes et sources sont autant de formes spectaculaires, propres au milieu karstique. Moins visibles, mais tout aussi importants, les réseaux de conduits souterrains sont même indispensables au développement de la plupart des formes superficielles.

Les particularités hydrologiques des régions karstiques sont également schématisées sur la figure 1. L'absence de rivière en surface en dehors des vallées principales s'explique par l'existence d'une couche altérée, très perméable située au sommet des calcaires (*épikarst*), capable d'absorber les eaux de surface. Une partie de l'eau est drainée directement par les conduits karstiques subverticaux traversant la *zone non-saturée* (vadose) caractérisant les milieux karstiques. Une autre partie de l'eau descend lentement à travers les petites fissures des calcaires. A partir d'une certaine profondeur, les eaux peuvent rencontrer un toit imperméable qui va les collecter et former des *rivières souterraines*. Souvent, les eaux atteignent la *zone noyée* avant

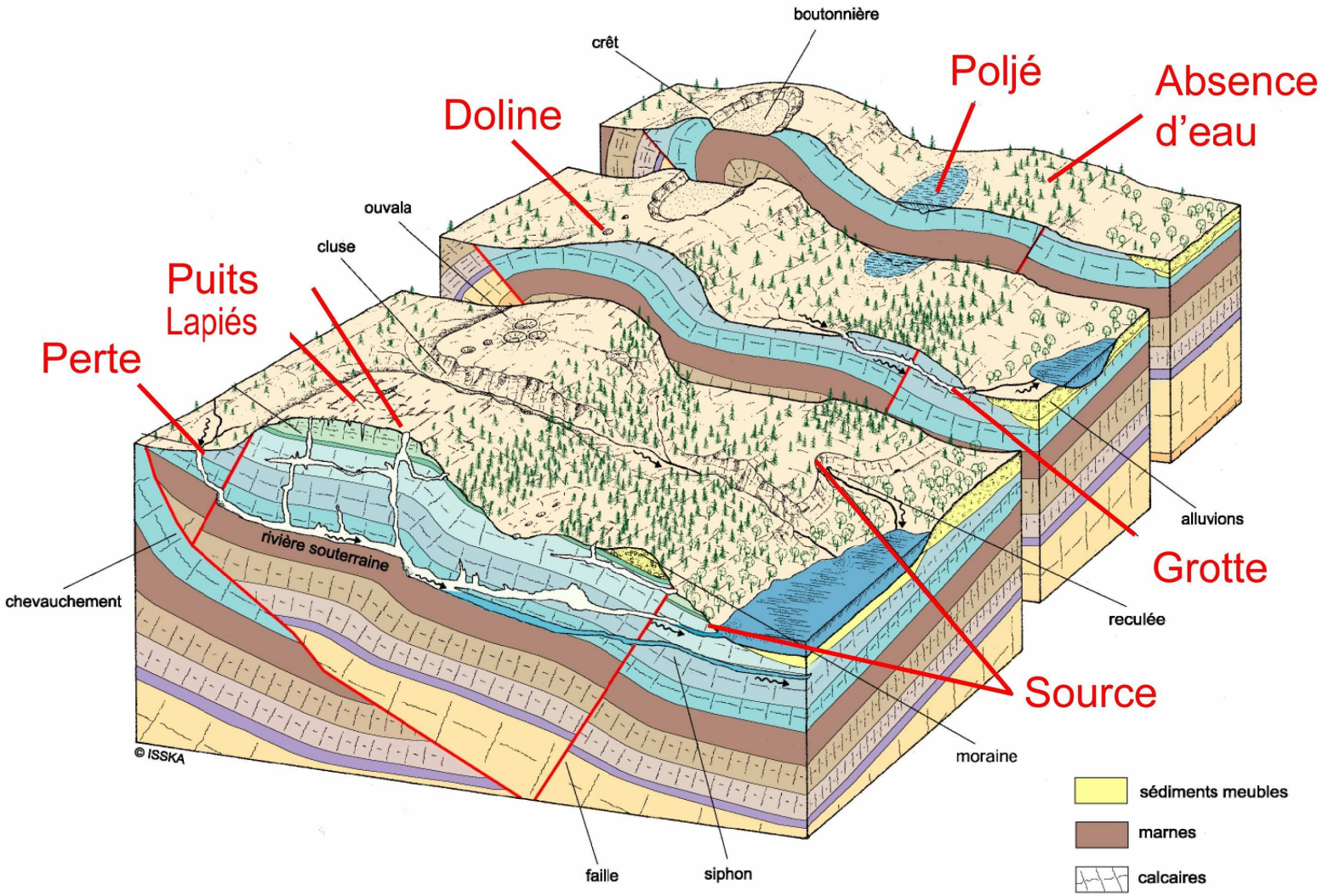


Figure 1 : Bloc diagramme résumant les principales particularités géomorphologiques (paysagères) et hydrologiques du milieu karstique (tiré de Jeannin et al. 2001).

d'atteindre un niveau imperméable. Dans cette zone où les fissures et les conduits sont tous remplis d'eau, l'écoulement n'est plus vertical, mais dirigé vers l'exutoire du système : la *source karstique.* En certains points de la surface, moins perméables, des ruisseaux peuvent se former, mais ils se perdent généralement dans des *pertes ou ponors*, alimentant le réseau de conduits souterrains

1.3 La karstification

La figure 2 résume le principe général de la karstification. Dès l'émersion des eaux marines, les roches calcaires (ou autres) sont soumises aux intempéries. Il existe toujours une porosité initiale dans la roche, même très faible, qui permet à l'eau de circuler. La circulation souterraine est d'abord infime. A la surface des calcaires, seule une portion congrue des pluies s'infiltre dans les rares et étroites fissures présentes, et l'essentiel de l'eau s'écoule en surface, emportant quelques centimètres de calcaire par millénaire.

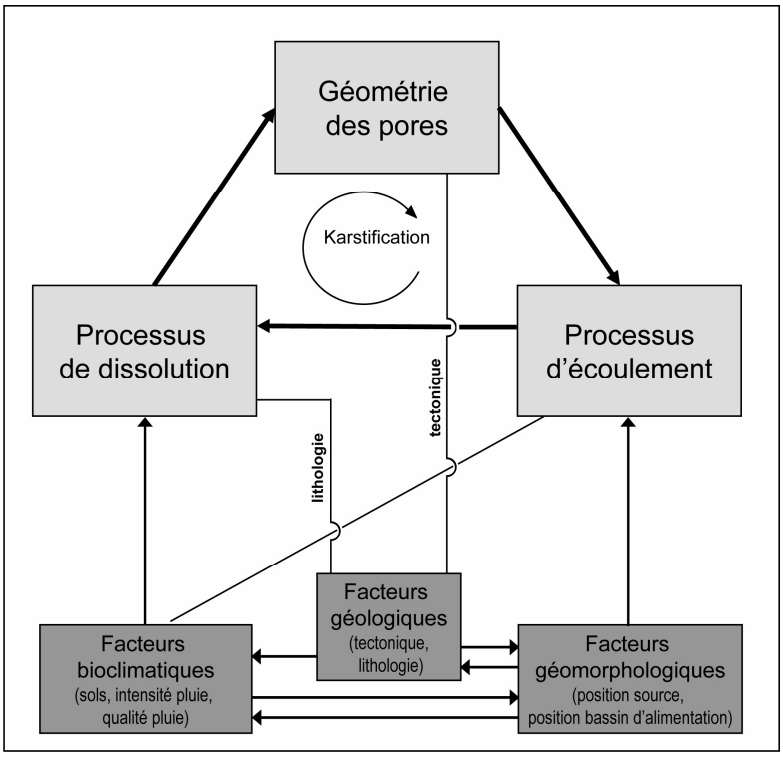


Figure 2 : Schéma décrivant le processus de la karstification et les facteurs qui le contrôlent (d'après Kiraly 1975, modifié). La porosité de la roche permet à l'eau de circuler, ce qui permet de dissoudre la roche et d'agrandir les pores. Le processus se développe tout seul et n'est limité que par la quantité d'eau d'infiltration disponible. L'application de ce schéma et l'observation des facteurs contrôlant la karstification permettent, dans certains contextes, de prévoir la position des conduits.

Peu à peu, la proportion d'eau s'infiltrant dans les fissures va s'accroître, car les eaux de pluie, très peu minéralisées, dissolvent progressivement les parois des fissures et des vides initiaux. Il faudra plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de milliers d'années, pour que la dissolution parvienne à créer des ouvertures de quelques millimètres au sein même de la roche. Evidemment, au fur et à mesure que les vides souterrains grandissent, l'eau s'infiltre de plus en plus facilement et circule de plus en plus rapidement, faisant disparaître progressivement tout écoulement en surface.

La dissolution de la roche en profondeur s'en trouve considérablement accélérée. Les vides souterrains s'agrandissent de plus en plus vite, augmentant encore le débit souterrain, accélérant la dissolution et l'élargissement des vides. Le processus s'accélère alors de manière fulgurante (processus de rétroaction positif). Les simulations effectuées sur ordinateur montrent qu'il ne faut que quelques milliers d'années pour passer de fissures de quelques millimètres d'ouverture à des grottes de plusieurs mètres de diamètre (Dreybrodt, 1988, 1990, 1996; Dreybrodt and Gabrovsek, 2000 ; Howard and Groves, 1995)

Le processus de la karstification est contrôlé principalement par la géométrie initiale des pores, les facteurs bioclimatiques (qualité et quantité des eaux d'infiltration), les facteurs géomorphologiques (position de la zone d'infiltration et des exutoires) et les facteurs géologiques (nature de la roche et discontinuités).

2. Pourquoi protéger le karst ?

Les ciselures, cannelures ou chaos des champs de lapiés (photos en première page de couverture), parfois sur des étendues de plusieurs dizaines de km^2 ou les alignements de centaines de dolines sont des formes uniques du paysage. Or, force est de constater que ces éléments, qui donnent leur caractère aux massifs karstiques, sont menacés : certains lapiés sont aplanis pour faciliter le passage des skieurs, les dolines sont souvent comblées de terre, ou pire de déchets pour rendre les terre agricoles plus praticables. Sans y prendre garde, l'essentiel du paysage typique des régions karstiques disparaît progressivement sous nos yeux. Par ricochet la biodiversité suit naturellement la même tendance (voir p. ex. Blant, 2001 : 77, où le lien entre végétation et géomorphologie est présenté explicitement). Dans l'idée d'un développement durable, des actions doivent être entreprises pour préserver ces paysages très typiques et les biotopes qui y sont associés.

Moins visibles, mais non moins importants, les paysages souterrains (photos en première page de couverture) renferment une richesse patrimoniale exceptionnelle (ISSKA, 2001 ; Jeannin et Wildberger, 2003a,b). Par exemple, la simple forme des galeries ou la présence de sédiments permet de reconstituer l'évolution du paysage superficiel au cours des temps géologiques. Les fossiles, cristaux et concrétions ornant les parois des grottes ne sont pas que de simples décors féeriques, mais aussi des mines de renseignements sur l'évolution des climats passés. Les grottes renferment également de nombreux ossements d'animaux disparus ou des vestiges archéologiques : en milieu alpin, ce sont pratiquement les seuls indices remontant au-delà de la dernière

période glaciaire. La faune souterraine est certes clairsemée et peu spectaculaire, elle n'en demeure pas moins riche du point de vue des espèces et surtout de leur évolution. Bien que naturellement protégés, ces éléments de notre patrimoine naturel sont menacés. La pollution des eaux d'infiltration, le tourisme spéléologique de masse dans des galeries peu adéquates, l'étanchement de certains secteurs, la modification significative des écoulements souterrains liée à certains ouvrages importants (p.ex. tunnel) sont autant de facteurs qui mettent en péril la conservation du milieu souterrain.

3. Pourquoi envisager des développements en milieu karstique ?

Les particularités mêmes du milieu karstique suscitent certains développements (figure 3 à droite), en particulier le tourisme, toujours friand de paysages insolites. Le calcaire étant un bon matériau de construction, les carrières ou mines y sont également nombreuses. Les karsts très anciens (paléokarsts) renferment souvent des minerais. En Suisse, en particulier dans le Jura, l'essentiel de la production en fer provenait de tels gisements (AA, 1993). Ces exploitations ont cessé depuis longtemps. De nos jours, des gisements importants de Zinc, Plomb et Aluminium proviennent de terrains karstiques, mais aucun sur notre territoire national. Le karst peut représenter une intéressante ressource en eau, soit pour de l'eau potable, soit pour produire de l'énergie hydro-électrique. En effet, l'efficacité du drainage karstique souterrain produit des sources au débit considérable. Ces sources ont d'ailleurs une température très constante, ce qui peut représenter un intéressant potentiel pour une exploitation géothermique.

Toutes les régions cherchent à se développer, indépendamment du milieu dans lequel elles se trouvent. Ainsi, les zones urbanisées s'étendent, l'agriculture cherche à rendre les terres aussi planes que possibles, les décharges fleurissent, sans parler des voies de communication et autres conduites qui entaillent le terrain.

Le développement est donc lié à la présence de l'Homme dans une région ; il ne pourra pas être arrêté. Il faut donc plutôt chercher à le guider.

4. Problèmes et atouts

La protection des richesses du milieu karstique est une tâche difficile dans la mesure où une grande partie de ces richesses n'est même pas connue ! En effet, il n'est pas rare de découvrir un site ostéologique pendant des travaux de terrassement. Les inventaires de sites dignes de protection ne sont par conséquent jamais complets et des objets de très grande valeur peuvent être trouvés dans des zones problématiques à protéger. L'amélioration de la connaissance du milieu est donc un élément important dans la gestion de sa protection.

Le développement est également souvent difficile, car les spécificités du milieu posent des problèmes pratiques. Certaines zone urbaines sont instables car posées sur des dolines, d'autres zones ont des problèmes de qualité d'eau dans leur captage d'eau potable, ou encore l'exploitant de la glacière souterraine touristique lambda remarque que son exploitation conjuguée au réchauffement climatique fait progressivement disparaître la glace… Seule une amélioration de la connaissance du milieu et de ses spécificités permet de gérer ces problèmes pratiques d'exploitation.

Comme l'illustre la figure 3, il y a un *intérêt commun* entre protection et développement, qui est celui de mieux connaître le milieu pour mieux le gérer. Ce constat peut paraître trivial, mais dans le cas du karst, ce sont réellement les mêmes connaissances qui sont requises pour faire face aux problèmes de conservation et de développement. Naturellement l'usage des connaissances risque de diverger entre les deux approches. Cependant, il est important de connaître pour disposer de critères permettant de pondérer le poids des arguments pour la conservation, respectivement pour le développement d'un site.

L'existence d'un intérêt commun entre protection et développement dans les milieux karstiques laisse place à quelques espoirs de tendre vers une gestion de plus en plus durable de cet environnement.

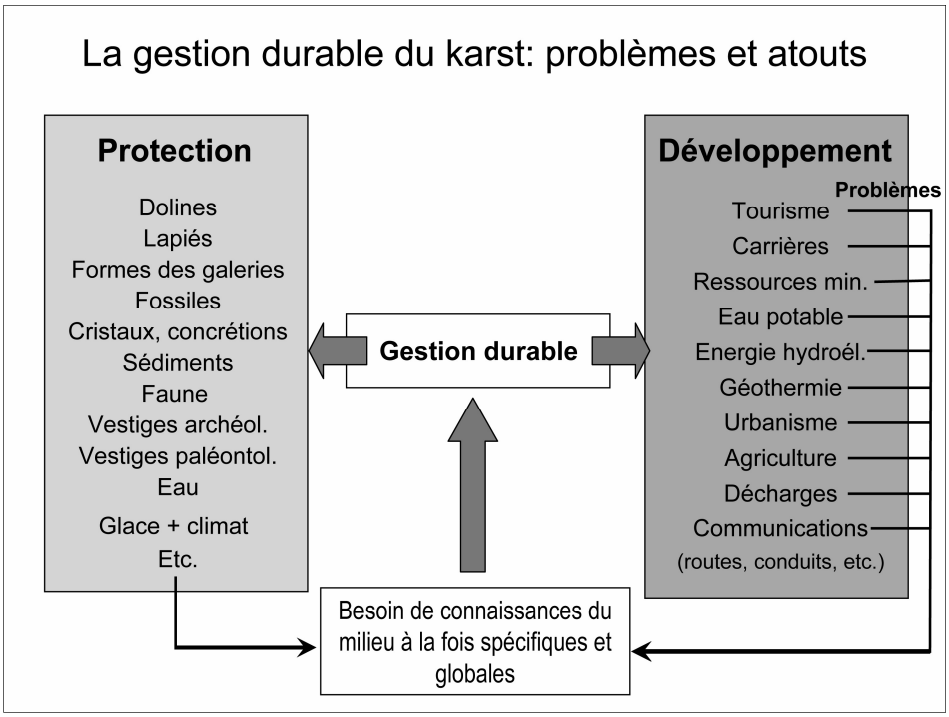


Figure 3 : Développement et protection peuvent apparaître comme diamétralement opposés. Or, particulièrement dans les milieux karstiques, ils nécessitent tous deux une connaissance détaillée du milieu qui fait souvent défaut. La recherche de cette connaissance devrait faciliter l'émergence d'un développement durable.

5. Quelques exemples

Les exemples qui suivent visent à illustrer brièvement quelques solutions proposées ces dernières années pour utiliser cet intérêt commun entre développement et protection du milieu karstique.

5.1 La méthode EPIK

Cette méthode vise à améliorer la délimitation des zones de protection des eaux en milieu karstique (Doerfliger et Zwahlen, 1998). Elle a été développée par l'université de Neuchâtel à l'initiative de l'office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), suite au constat de l'inefficacité des délimitations basées sur les critères valables pour les milieux à porosité d'interstices (Doerfliger et al., 1999). En particulier la délimitation de la zone de protection S2, basée sur le critère d'un temps de transit de 10 jours posait problème puisqu'une telle durée correspond généralement (du moins en apparence) à l'ensemble du bassin d'alimentation des captages en milieu karstique.

La protection des eaux karstiques était donc dans une impasse, puisque la quasi totalité des zones karstiques devait être mise en zone S2, avec toutes les restrictions que cela impose. Dans la pratique, soit les délimitations proposées n'étaient pas applicables, soit les zones étaient réduites arbitrairement pour être applicables sur le terrain. Dans les deux cas, la protection des eaux n'était pas garantie.

Dans un bassin d'alimentation supposé connu, la méthode EPIK propose donc de rechercher les zones qui sont réellement les plus directement reliées au captage (zones dites vulnérables) et de les placer en zone S1 (protection rapprochée, généralement limitée aux alentours immédiats du captage). Les zones assez directement reliées au captage sont placées en zone S2 (protection contre les contaminations biologiques, classiquement avec un temps de transit de moins de 10 jours jusqu'au captage). Enfin, les zones S3 couvrent le reste du bassin d'alimentation. L'originalité de la méthode EPIK est de prendre en compte implicitement la très forte hétérogénéité spatiale des perméabilités des milieux karstiques. En effet, un point proche du captage peut présenter un temps de transit long, car il est mal connecté au réseau de conduits karstiques, alors qu'un point très éloigné, par exemple une perte, peut présenter un temps très court et se retrouver en zone S1. L'approche EPIK propose de cartographier sur le terrain 4 éléments.

E = **E**pikarst	P = couche **P**rotectrice
I = conditions d'**I**nfiltration	K = réseau **K**arstique

La combinaison de ces quatre cartes permet d'obtenir la carte de vulnérabilité qui est ensuite transformée en zones de protection des eaux. Au lieu d'obtenir une structure concentrique, comme c'est le cas dans les milieux à porosité d'interstices, le résultat rappelle plutôt une « peau de léopard ».

La figure 4 présente deux cartes (fictives) de délimitations qui auraient pu être obtenues en appliquant une approche « classique », c'est-à-dire utilisable pour les milieux à porosité d'interstices. L'une offre une très mauvaise protection pour les eaux du captage, l'autre devrait assez bien protéger les eaux, mais sera très restrictive pour l'agriculture. Malgré cela, elle ne protège pas très bien les eaux, puisque la délimitation par la méthode EPIK montre que des points éloignés du captage doivent être placés en zone S1 ! La carte obtenue par la méthode EPIK représente donc un bien meilleur compromis entre protection des eaux et activités agricoles, puisque la protection des eaux est (en principe) meilleure que celle proposée par les deux autres cartes et que les restrictions pour les exploitations agricoles sont incomparablement plus faibles que celles de la carte du milieu.

Cet exemple illustre assez bien le fait qu'une meilleure connaissance du milieu permet d'optimiser la gestion durable en fournissant des arguments fondés pour protéger mieux certains secteurs et moins d'autres zones.

Notons finalement que la méthode EPIK n'est pas parfaite et renferme différentes incertitudes, voire défauts qui seront certainement améliorés dans le futur. Le principe de base de la méthode n'en reste pas moins valable.

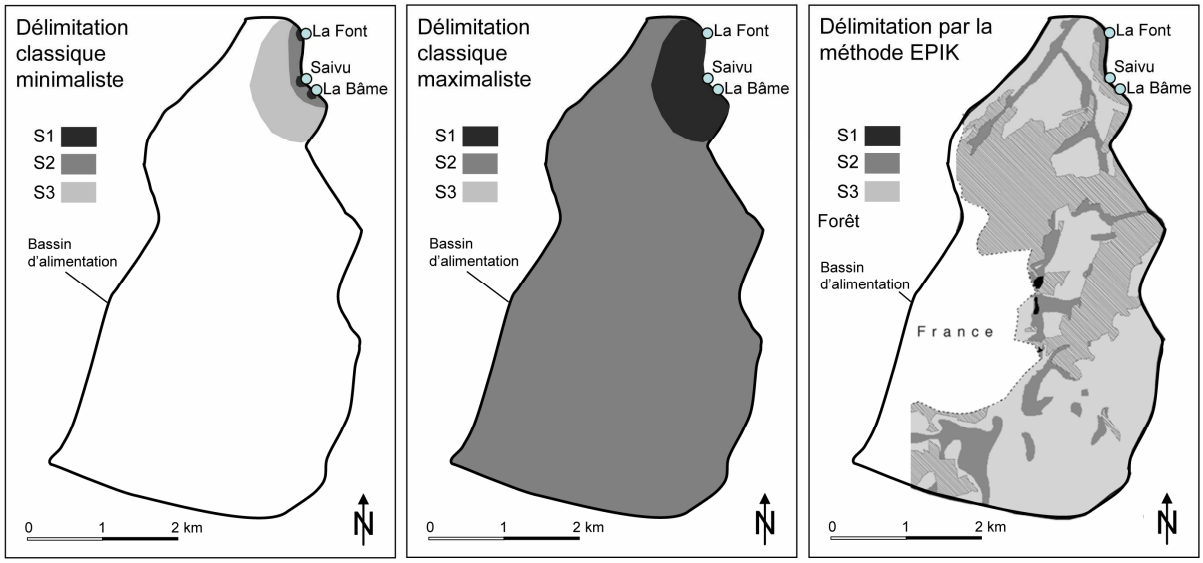


Figure 4 : Exemple de délimitations de zones de protection des eaux sur le bassin d'alimentation des sources du Saivu et de la Bâme (Boncourt, JU). La délimitation par la méthode EPIK (à droite) représente un compromis maximisant les objectifs de protection des eaux et minimisant les restrictions d'utilisation du territoire.

5.2 Construction d'une autoroute en milieu karstique, l'exemple de l'A16

La transjurane (A16) traverse des régions karstiques sur l'essentiel de son tracé. Au nord de Porrentruy, elle passera à travers le bassin d'alimentation

des sources du Saivu et de la Bâme de Milandre. Ce bassin est caractérisé par la présence de la plus grande grotte du Jura suisse, cavité renfermant de nombreuses particularités qui ont incité les experts à la considérer comme un géotope d'importance nationale (Arbeitsgruppe Geotopschutz Schweiz, 1999).

Pour les ingénieurs, la présence de cette grotte posait a priori plus de problèmes qu'elle ne présentait d'avantages (figure 5). En effet, il a fallu prévoir toute une série de mesures particulières pour protéger au mieux l'intégrité de ce site exceptionnel. Par exemple, certaines mesures visaient à limiter les ébranlements pour ne pas casser les concrétions millénaires, d'autres à éviter un afflux de particules engluant la grotte et troublant les eaux souterraines, d'autres encore à prévenir toute pollution des eaux souterraines, qui participent en aval à l'alimentation en eau potable du village voisin de Boncourt. Le problème ayant été reconnu dès le départ par les autorités cantonales, la gestion de la protection du site a été intégrée très tôt au projet autoroutier, ce qui a permis de travailler dans un esprit très constructif et finalement de limiter les surcoûts par une planification bien intégrée.

En outre, la connaissance du réseau souterrain a permis d'éviter quelques surprises, en particulier l'exploration de cheminées remontant très près de la surface à permis d'éviter de « tomber » dans des zones riches en vides, dangereuses et problématiques pour le chantier. Le tracé de l'autoroute a donc été ajusté pour éviter ce secteur. De même la connaissance exacte des principaux écoulements souterrains a permis de cibler les mesures particulières pour la protection des eaux à un secteur bien défini. On remarque donc clairement que la bonne connaissance du milieu karstique permet non seulement de mieux le protéger, mais aussi de le développer de manière plus adéquate.

5.3 Construction de tunnels en milieu karstique

Parmi les problèmes classiques rencontrés dans les tunnels forés en roches compactes, le karst représente un nombre important de cas. Les plus spectaculaires sont les arrivées massives d'eau lorsqu'un conduit aquifère est recoupé, ou la traversée d'un vide, nécessitant parfois de construire un pont dans le tunnel. Or la prévision de tels aléas est encore trop souvent considérée comme impossible, et elle est simplement intégrée aux projets sous la forme d'un facteur de risque global. Cette situation est peu satisfaisante et engendre, lorsque l'aléa se présente, des surcoûts souvent très importants. Cependant, des solutions existent ! En effet, le développement conjugué de la cartographie des réseaux de conduits karstiques et des outils de représentation, d'analyse et de modélisation de ces réseaux a été considérable pendant les 20 dernières années. Ainsi, des modèles basés sur les principes décrits au chapitre 1 ont vu le jour et permettent de mieux comprendre et donc de prévoir la géométrie des réseaux souterrains.

L'analyse de la géométrie des réseaux karstiques connus indique que, dans certains contextes, des facteurs géologiques (encore à définir avec précision !) ont dominé et contrôlé la position précise des conduits. Dans ces contextes là, la prévision est parfaitement possible.

A ce stade, les connaissances existent uniquement au niveau de la recherche académique (Lowe, 1992 ; Palmer, 1999 ; Lowe, 2000) et il est temps d'envisager de les transférer vers la pratique.

Par cet exemple nous avons démontré que le travail de documentation, d'étude et de compréhension, mené dans le seul objectif de mieux comprendre la nature, donne accès à des connaissances qui, dans un proche avenir, auront des retombées pratiques assez évidentes. Développement et conservation partageront alors un objectif commun qui est d'éviter au maximum de rencontrer des cavités karstiques. On réduira ainsi les problèmes techniques, mais également l'impact des ouvrages sur l'environnement (grottes et eaux souterraines).

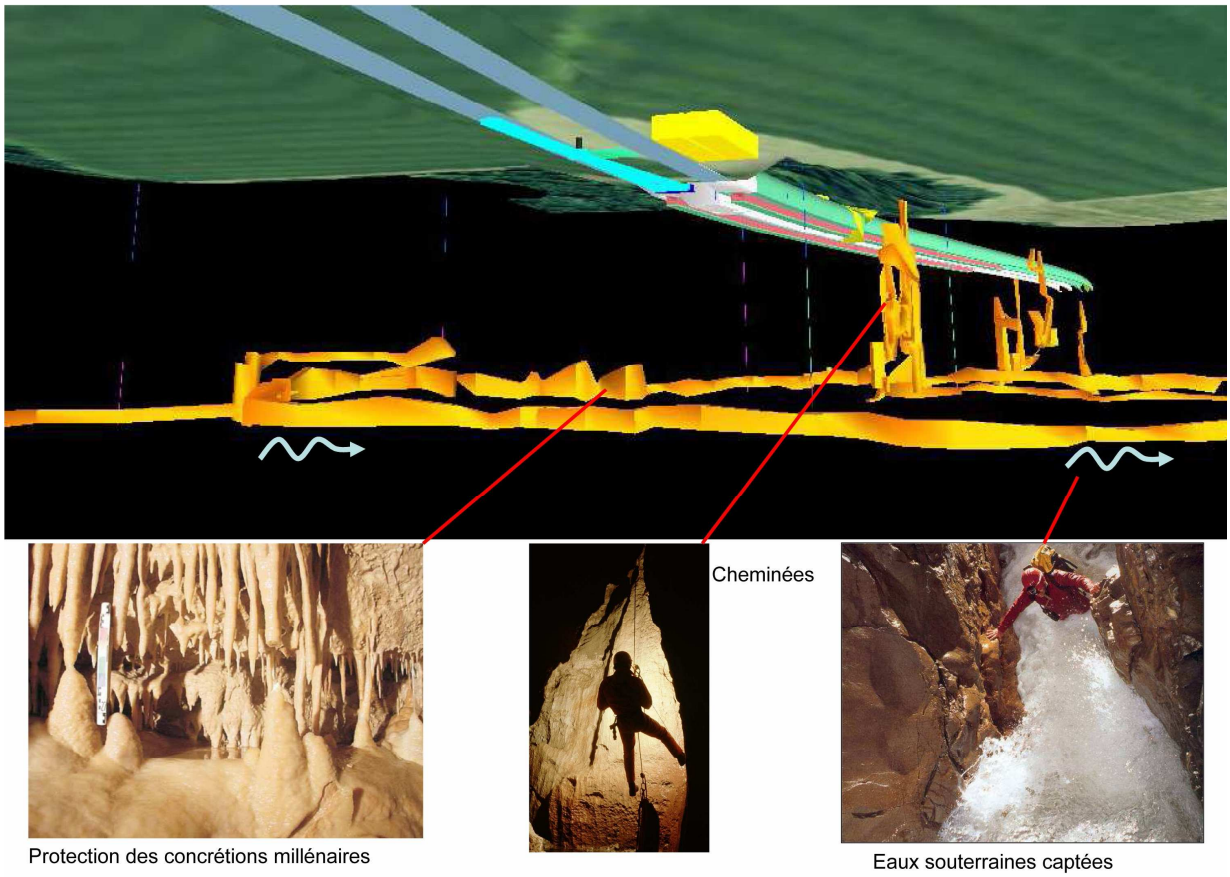


Figure 5 : Schéma 3D (vu de dessous) du projet autoroutier de l'A16 (transjurane) à proximité de la grotte de Milandre (Boncourt, JU). Diverses mesures de protection de la grotte (eau souterraines et concrétions) ont permis de limiter les surcoûts et de protéger le milieu. Par ailleurs, les cheminées reconnues dans la grotte ont permis d'éviter les surprises géologiques…

6. Conclusions

En milieu karstique, développement d'un côté, et conservation de la nature de l'autre, sont inféodés à une connaissance détaillée des particularités du milieu. L'émergence de cet *intérêt commun* devrait représenter un contexte favorable pour tendre vers un développement durable. Il ne faut toutefois pas idéaliser et des divergences fondamentales entre développement et conservation subsisteront toujours. Cependant, la complexité et le côté souvent spectaculaire des phénomènes karstiques imposent un certain respect pour cette nature de la part de ceux qui veulent y développer des aménagements et une certaine fascination à en maîtriser les problèmes du côté des personnes qui veulent la protéger.

L'exploitation d'eau potable ou celle de ressources d'énergies renouvelables présentent des potentiels de développement encore très intéressants dans les milieux karstiques. Actuellement ces ressources sont largement sous-exploitées car des problèmes pratiques liés à une connaissance insuffisante du milieu se posent. La localisation (prévision, détection, exploration) des réseaux de conduits karstiques est un élément clé à maîtriser pour rendre ces potentialités exploitables. C'est aussi par une connaissance approfondie des réseaux karstiques qu'il est possible de protéger les richesses du monde souterrain, y compris les eaux, contre les influences négatives du monde extérieur.

Bibliographie

AA (1993). La sidérurgie ancienne du Jura. Minaria helvetica 13, 50-120.

Arbeitgruppe Geotopschutz Schweiz (1999). Inventar der Geotope Nationaler Bedeutung, *Geologica Insubrica Vol. 4/1 : 25-48.*

Commission mondiale sur l'environnement et le développement (CMED) (1988). *Notre avenir à tous.* Éditions du Fleuve / Les publications du Québec, Montréal, 434 p.

Doerfliger N., Zwahlen F. (1998). Cartographie de la vulnérabilité en milieu karstique (EPIK) – Application aux zones de protection des eaux souterraines, *Série : L'environnement pratique, Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), 56 p.*

Doerfliger N, Jeannin P.-Y., Zwahlen F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments : a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method), *Environmental Geology 39(2), pp. 165-176.*

Dreybrodt W. and Gabrovsek F. (2000). Dynamics of the evolution of a single karst conduit, in : Klimchouk, Ford, Palmer and Dreybrodt (eds) : *Speleogenesis, evolution of karst aquifers*, NSS Publisher, 184-193.

Dreybrodt W. (1996). Principles of early development of karst conduits under natural and man-made conditions revealed by mathematical analysis of numerical models, *Water Resources Research 32, 2923-2935.*

Dreybrodt W. (1988). *Processes in karst systems – Physics, Chemistry and Geology*, Springer Series in Physical Environments 4, Berlin et New York, 288 p.

Dreybrodt W. (1990). The role of dissolution kinetics in the development of karst aquifers in limestone : a model simulation of karst evolution, *Journal of Geology, vol. 98, 639-655.*

Dreybrodt W., Gabrovsek F. (2000). Dynamics of the evolution of a single karst conduit, in : Klimchouk, Ford, Palmer and Dreybrodt (eds) : *Speleogenesis, evolution of karst aquifers*, NSS Publisher, 184-193.

Ford D., Williams P. (1989). *Karst geomorphology and hydrology,* Unwin Hyman, London, 601 p.

Howard A. D., Groves C. G. (1995). Early development of karst systems. 2. Turbulent flow, *Water Resources Research 31, 19-26.*

ISSKA (2001). *Conservation du patrimoine spéléologique et karstique suisse : proposition en vue d'une gestion durable et efficace,* Brochure d'information à l'attention des administrations, Société Suisse de Spéléologie, 16 p., disponible sous www.spéléo.ch/commissions/ protection/index_fr.php.

Jeannin P.-Y., Wildberger A. (2003a). Höhlen- und Karstgeotope : Beispiele und Überlegungen / Les géotopes spéléologiques et karstiques : exemples et réflexions, *Stalactite, journal de la SSS / SGH, 53, n°2-2003 : 8-11.*

Jeannin P.-Y., Wildberger A. (2003b). Karst und Höhlen in der Schweiz : Wertvolle, aber häufig verkannte Geotope – Eine Übersicht der laufenden Erhebung, in : Jordan P., Heinz R., Heizmann P., Hipp R., et Imper D. (Ed.) : *Geotope - wie schützen / Geotope wie nutzen?* 7. Internationale Jahrestagung der Fachsektion GEOTOP der Deutschen Geologischen Gesellschaft gemeinsam mit der Arbeitsgruppe Geotope des Geoforums der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften, Bad Ragaz 19.-24. Mai 2003 Schriftenreihe Deutsche Geologische Gesellschaft (DGG), Heft 31 (Tagungsband), S. 1-145; Hannover 2003, 80 - 84.

Jeannin P.-Y., Blant D., Rodriguez Quiroga A., Gaiffe M. (2001). Paysages, roches et sols, in : Blant M. et al. (2001) : *Le Jura, les paysages, la vie sauvage, les terroirs*. Editions Delachaux et Niestlé, Paris, 9 - 76.

Kiraly L. (1975). Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques, in : Burger A. et Dubertret L. (eds) *Hydrogeology of karstic terrains : Case histories*, International Union Geol. Sci., Series B, 3, 53-67.

Lowe D. (1992). *The origin of limestone caverns : in inception horizon hypothesis*, PhD thesis, Manchester Polytechnic, UK, 511 p.

Lowe D. (2000). Role of stratigraphic elements in speleogenesis : the speleo-inception concept, in : Klimchouk, Ford, Palmer and Dreybrodt (eds) : *Speleogenesis, evolution of karst aquifers*, NSS Publisher, 65-76.

Palmer A.N. (1999). Patterns of dissolution porosity in carbonate rocks, in : Palmer A.N, Palmer M.V. and Sasowsky I.D. (eds) : *Karst modelling*, Karst Waters Institute special publication Nr 5.

L'expertise et la médiation scientifiques : des outils pour la gestion durable de l'environnement karstique. Quelques pistes de recherche développées par le laboratoire Edytem.

Fabien HOBLEA
Laboratoire Edytem UMR CNRS 5204, Centre Interdisciplinaire Scientifique de la Montagne (CISM), Université de Savoie, Technolac, 73 376, Le Bourget du Lac cedex, France.
fabien.hoblea@univ-savoie.fr

Résumé

Le laboratoire Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne (Edytem, Université de Savoie, France) a pour vocation de conduire une recherche pluridisciplinaire (géosciences et sciences humaines) au service du développement durable des territoires montagnards. Parmi ses centres d'intérêt majeurs figure l'étude des systèmes karstiques et de leur gestion environnementale. Cette dernière peut bénéficier de la part des scientifiques de contributions multiples dont les domaines sont ici présentés dans leur cadre conceptuel et au travers d'actions concrètes d'expertise et de médiation scientifiques menées par Edytem en région Rhône-Alpes (France). Ces actions relèvent de la gestion de deux ressources-patrimoniales bien présentes dans le karst : les eaux et les paysages souterrains. Il ressort au final que les scientifiques du karst peuvent et devraient être impliqués dans chaque niveau d'action du processus de gestion intégrée d'une ressource patrimoniale : connaissance et évaluation ; exploitation et valorisation ; préservation ; organisation, coordination administrative et suivi des procédures de gestion ; information et communication entre acteurs et auprès des utilisateurs et du public (médiation scientifique). Sur ce dernier point, le milieu karstique se révèle être un support très pertinent pour la pratique de l'éducation à l'environnement envisagée comme un des vecteurs du développement durable.

Mots-clefs : gestion environnementale, ressource patrimoniale, expertise scientifique, médiation scientifique, karst, Rhône-Alpes.

Abstract

The laboratory Edytem ("Environments, Dynamic and Territories of the Mountain", University of Savoy, France) has the role to undertake a multi-field research (geosciences and social sciences) to the service of the sustainable development of the mountain territories. Among its major centers of interest, the study of the karstic systems and their environmental management appears. The latter can profit on behalf of the scientists of multiple contributions whose fields are presented here within their conceptual framework through concrete actions

of scientific expertise and mediation carried out by Edytem in the Rhone-Alps region (France). These actions concern the management of two patrimonial-resources quite present in the karst : underground water and landscapes. It arises, at the end, that the scientists of the karst can and should be implied in each level of action of the process of integrated management of a patrimonial-resource : knowledge and evaluation ; exploitation and valorisation ; safeguarding ; organization, coordination and monitoring of the procedures of management ; information and communication between actors and near the users and of the public (scientific mediation). On this last point, the karstic medium proves to be a very relevant support for the practice of education to the environment under consideration like one of the vectors of the Sustainable Development.

Keywords : environmental management, patrimonial resource, scientific expertise, scientific mediation, karst, Rhône-Alpes.

1. Introduction : présentation du laboratoire Edytem

Le laboratoire Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne (Edytem) est une Unité Mixte de Recherche Université de Savoie/Centre National de la Recherche Scientifique (UMR 5204). Il est né de la fusion en octobre 2002 du Laboratoire de Géologie et d'Hydrogéologie des Aquifères de Montagne (LGHAM) et du Laboratoire de Géographie de l'Université de Savoie (LGUS). Il a pour vocation de conduire une recherche au service du développement durable des territoires montagnards. Résolument interdisciplinaire, il réunit des géologues et hydrogéologues, des géographes et des économistes au sein de trois équipes travaillant de manière transversale sur le thème fédérateur des dynamiques actuelles et passées des milieux et territoires de montagne.

Ses champs de recherche sont aussi bien fondamentaux qu'appliqués et concernent plus particulièrement : les reconstitutions paléogéographiques et paléoclimatiques, les effets locaux du Global Change, la part de l'Homme et de l'évolution naturelle dans les changements environnementaux actuels des milieux de montagne, les vulnérabilités des milieux et territoires montagnards et les méthodes, outils et modalités d'évaluation, de valorisation et de gestion des ressources et patrimoines (naturels et/ou culturels) des territoires de montagne.

Sur ce dernier point, le laboratoire Edytem s'intéresse plus particulièrement aux ressources et patrimoines des montagnes et plateaux karstiques, en relation notamment avec la problématique de la gestion des ressources territoriales de la Région Rhône-Alpes. Il s'agit ici de présenter, au travers des études et recherches menées par Edytem sur ce territoire, des exemples possibles de contribution concrète des scientifiques à la gestion durable de l'environnement karstique. Cette contribution doit se fonder préalablement sur une analyse des enjeux territoriaux qui permet d'ajuster et définir l'apport des scientifiques. Cette phase est capitale : elle vise à placer d'entrée l'intervention des scientifiques dans une position d'équilibre (souvent précaire !) entre les impératifs factuels commandés par l'état des phénomènes supports de ressources et patrimoines, et la demande sociale et politique, laquelle peut au bout du compte être éclairée (voire infléchie) par un argumentaire scientifique *ad hoc*.

2. Des apports scientifiques répondant aux enjeux d'une gestion durable de l'environnement karstique dans la région Rhône-Alpes (France)

La Région Rhône-Alpes fonde une grande partie de son identité sur le milieu montagnard. Or, la moitié de la superficie des reliefs rhônalpins, montagnes et plateaux, se développe dans des terrains karstiques, essentiellement calcaires, parfois gypseux.

2.1 Ressources patrimoniales du karst rhônalpin

Les karsts rhônalpins recèlent des sites et des ressources à haute valeur patrimoniale et économique, phénomènes remarquables qui ne sont que la « partie émergée » d'un milieu dont le fonctionnement de type systémique implique une gestion globale de cet environnement particulier, à l'échelle des bassins-versants karstiques.

Nous désignons ici comme « ressources patrimoniales du karst » des éléments présents dans le milieu karstique dont l'usage, effectif ou potentiel, et la valeur (économique, éthique, identitaire…) ne peuvent être pérennisés que si l'intégrité et les qualités initiales de ces éléments sont conservées ou réhabilitées pendant et après l'usage qui en est fait.

Les principales ressources patrimoniales liées au karst en Rhône-Alpes concernent les paysages, souterrains avec notamment les cavités fortement concrétionnées (Aven d'Orgnac en Ardèche, grottes de Choranche en Isère, etc.) et de surface (canyon de l'Ardèche et Pont d'Arc, bois de Païolive en Ardèche ; Désert de Platé, Gorges du Fier en Haute-Savoie, etc.), les vestiges archéologiques (grotte Chauvet en Ardèche, etc.) et paléontologiques (grotte aux ours de la Balme à Collomb en Savoie, etc.), les eaux souterraines (captées pour divers usages et incontournables dans certains secteurs comme le cœur du Parc Naturel Régional du Massif des Bauges).

2.2 Des ressources menacées à ménager

Rhône-Alpes est l'une des régions françaises les plus dynamiques. Quoiqu'inégalement répartie, la pression anthropique sur le milieu karstique y est forte et, à l'exception de quelques zones rurales en déprise, ne cesse de s'accroître. Paradoxalement, les menaces sur les ressources patrimoniales du karst augmentent alors que la demande sociale pour un usage en tant que telles (donc protecteur) est en plein essor, induisant une prise de conscience politique des problèmes et des enjeux d'une gestion durable de l'environnement karstique.

Celle-ci passe par une identification sans concession des menaces, liées à ce que nous appellerons ici des « activités interférentes », c'est-à-dire qui s'exercent en milieu karstique sans pour autant avoir besoin des spécificités de ce milieu (lesquelles sont même parfois traitées comme des adversités), ou sans avoir besoin ou être en mesure de préserver l'intégrité des milieux et des ressources utilisées. Ce type d'activité est fortement générateur d'impacts pour les ressources patrimoniales karstiques (tableau 1).

A l'inverse, il existe un certain nombre d'activités alternatives qui reposent sur une valorisation préservatrice des ressources patrimoniales du karst (tableau 2). Cela ne signifie pas qu'elles ne produisent aucun impact sur le milieu, mais elles ont intérêt à faire des efforts pour que ces impacts soient bien connus et atténués, sans quoi elles peuvent elles-mêmes en souffrir en retour à plus ou moins long terme.

Activités	Eaux karstiques		Paysages et vestiges	
	qualité	quantité	exokarstiques	endokarstiques
Agriculture	X	X	X	X
Urbanisation	X		X	
Sports d'hiver (équipements...)	X	X	X	X
Carrières, mines	X		X	X
Grands chantiers	X	X	X	X
Industrie rurale, hydroélectricité	X	X	X	

Tableau 1 : Aperçu synoptique des impacts des « activités interférentes » sur les ressources patrimoniales karstiques. X *signifie : impacts sur…*

Activités	Eaux karstiques		Paysages et vestiges	
	qualité	quantité	exokarstiques	endokarstiques
Tourisme souterrain	+	+	(+)	+
Circuits/sentiers thématiques	+	+	+	(+)
Espaces de restitution	+	+	(+)	+
Animation touristique et culturelle	+	+	+	+
Education citoyenne	+	+	+	+
AEP, captages, thermalisme	+	+	(+)	(+)

Tableau 2 : Valorisation des ressources patrimoniales karstiques par les « activités alternatives ». + signifie valorisation directe et (+) signifie valorisation indirecte ou secondaire.

2.3 Les scientifiques acteurs d'une gestion durable des ressources du karst

Une gestion efficiente de l'environnement karstique rhônalpin dans la perspective d'un développement territorial durable implique de trouver, au niveau politique, le bon dosage et surtout le bon zonage spatial entre activités

interférentes et activités valorisantes. Si parmi les premières certaines sont irremplaçables au moins à court terme, les activités valorisantes peuvent constituer des solutions consensuelles, complémentaires ou alternatives, dans certains types d'espace et territoires où les exigences de qualité environnementale passent au premier plan (Parc Naturels Régionaux et espaces « naturels » protégés par exemple).

Si les décisions en la matière sont du domaine politique et institutionnel, nous pensons que les scientifiques du karst ont un rôle à jouer dans le processus de gestion environnementale du milieu, en produisant notamment un certain nombre de données et d'outils d'aide à la décision. De façon plus détaillée et à la lumière de l'expérience des chercheurs d'Edytem, la contribution des scientifiques en vue d'une gestion durable de l'environnement karstique peut être résumée comme suit :

- Fournir des données scientifiques répondant au besoin de gestion et de développement des activités valorisantes et protectrices ;
- Quantifier les impacts négatifs des activités interférentes et valorisantes ;
- Développer des solutions remédiatrices ou minimisatrices ;
- Participer à la formation des gestionnaires et acteurs de l'aménagement et du développement territorial des espaces karstiques ;
- S'impliquer dans la médiation scientifique et culturelle à destination du jeune public (dont scolaires) et grand public.

Ces actions peuvent être classées en deux grandes catégories, qui se recoupent parfois : l'expertise et la médiation scientifiques.

L'expertise scientifique consiste pour un laboratoire de recherche (hors donc de l'acception juridique du terme) à mettre des compétences spécifiques et reconnues au service d'un maître d'ouvrage ou d'un commanditaire dans le cadre, pour notre contexte, d'opérations d'aménagement du territoire et de gestion de l'environnement.

La médiation scientifique consiste à transmettre de manière adaptée un contenu scientifique à des non spécialistes (grand public, mais aussi élus, voire gestionnaires) en vue de répondre à un besoin d'information du politique et de l'administration, ou de satisfaire une démarche cognitive et/ou culturelle volontaire ou encore pour satisfaire à un objectif pédagogique de sensibilisation et d'éducation citoyenne, éducation à l'environnement en l'occurrence ici.

Pour illustrer ces divers aspects, nous présentons quelques exemples issus des interventions récentes ou en cours menées par des membres d'Edytem, en collaboration avec les institutions compétentes.

3. Exemples de recherches-action menées par le laboratoire Edytem dans le cadre de procédures de gestion et de valorisation des ressources patrimoniales karstique

Ces exemples sont volontairement limités aux deux principaux types de ressources patrimoniales karstiques : les eaux souterraines d'une part, et les paysages et sites à forte valeur patrimoniale d'autre part.

3.1 Contribution à la gestion des eaux karstiques

La gestion intégrée des ressources en eau suppose une bonne connaissance et délimitation des gisements et réservoirs, une appréciation de la vulnérabilité de la ressource et des impacts potentiels ou réels des activités anthropiques, la détermination de modes de prospection et d'exploitation de la ressource adéquats et efficaces, une coordination des divers acteurs impliquant l'usage d'outils et langages communs. Les chercheurs hydrogéologues et karstologues ont un rôle à jouer dans chacun de ces niveaux d'actions, comme le montrent les exemples sommairement présentés ci-dessous.

3.1.1 Contribution à l'inventaire et la caractérisation des aquifères patrimoniaux karstiques du bassin Rhône-Méditerranée et Corse

L'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (RMetC), institution française en charge de la gestion des eaux de surface et souterraines du bassin-versant fluvial du Rhône et des fleuves côtiers méditerranéens et de la Corse, en association avec son homologue Adour-Garonne, pilote depuis plus de sept ans une étude visant à l'inventaire et la caractérisation d'un certain nombre d'aquifères karstiques identifiés comme ressource patrimoniale. Sont ainsi qualifiés des systèmes karstiques intéressants pour l'alimentation en eau des populations et activités humaines et devant être à ce titre mieux connus pour optimiser leur exploitation en cours ou préserver leur potentiel dans la perspective d'une possible mise en exploitation en fonction des besoins futurs.

Cette étude repose sur une base de données (sur Access) et un S.I.G. (sur ArcInfo) spécifiques, dont la conception et le renseignement ont été confiés à des bureaux d'étude spécialisés. Ces derniers, malgré le budget conséquent consacré à l'étude, se sont vite heurtés à l'ampleur de la tâche et au fait que le personnel de ces entreprises n'étant pas au contact direct avec les terrains étudiés, il lui a été très difficile et long, voire parfois impossible dans les délais impartis, de mettre correctement en forme les données recueillies dans la bibliographie et auprès des chercheurs de terrain, malgré le soutien d'un comité de pilotage composé de scientifiques et gestionnaires proches du terrain.

L'étude n'ayant pas abouti dans les temps escomptés, l'Agence de l'Eau RMetC a dû se résoudre à confier l'achèvement de la tâche à des structures plus proches des terrains ayant posé problème, petits bureaux d'étude implantés localement employant des hydrogéologues travaillant sur les systèmes karstiques étudiés et avec les laboratoires de recherche spécialisés en hydrogéologie karstique.

Outre sa participation au comité de pilotage, le laboratoire Edytem est ainsi impliqué dans le complément final d'étude pour sept ensembles de systèmes karstiques: ceux des Bauges, des Bornes-Aravis, du Chablais, de la Chartreuse, du Jura savoyard, de la Vanoise et du Vercors.

Cet exemple montre qu'il est finalement contre-productif de ne pas intégrer dès le départ les détenteurs et producteurs des connaissances tirées du terrain parmi les acteurs centraux des inventaires et synthèses sur la ressource en eau. Pour ce qui concerne les chercheurs issus de la fonction publique, cette implication forte suppose, dans le contexte actuel de la recherche française, de dégager du temps et des moyens qui ne peuvent se justifier que dans le cadre d'une relation contractuelle et partenariale entre les structures concernées (Agence de l'Eau commanditaire et groupements bureaux d'étude/laboratoires de recherche comme prestataires).

3.1.2 Recherches sur les hydrosystèmes karstiques à fonctionnement complexe

Hydrosystèmes hybrides mettant en jeu eaux de surface et eaux souterraines, ainsi que des perméabilités de grandeur contrastée, les aquifères karstiques de montagne sont d'autant plus complexes qu'ils se développent dans des contextes géologiques des plus compliqués. C'est le cas notamment aux alentours des grands contacts tectoniques alpins mettant en relation des roches de nature et au comportement aquifère variés.

Indicateurs de cette complexité, les aquifères thermo-minéraux des Alpes françaises du Nord sont qui plus est porteurs d'importants enjeux de développement économique, à la base d'une activité thermale ancienne qui cherche un second souffle. Ce dernier passe par une accentuation de la pression quantitative sur la ressource tout en préservant ou réhabilitant une qualité menacée dans la majorité des cas.

La plupart des aquifères thermo-minéraux exploités dans cette partie des Alpes impliquent dans leur fonctionnement des circulations et phénomènes karstiques. Deux de ces hydrosystèmes, ceux d'Aix-les-Bains et La Léchère (Savoie), font actuellement l'objet d'études poussées par le laboratoire Edytem, financées par les établissements thermaux concernés qui supportent notamment chacun le coût d'un travail de thèse (Stéphanie Gallino pour Aix et Emilie Thiébaud pour La Léchère).

De même, les sources d'eau minérale mises en bouteille sont issues d'aquifères souvent encore mal connus et tout aussi complexes, dont le contexte géologique implique l'examen des interactions possibles avec le karst dans un souci de protection fine de la ressource. C'est un des aspects du sujet de thèse en cours sur les eaux d'Evian, financé par le groupe Danone et mené par Anne Guyomard au sein du laboratoire Edytem (Guyomard, 2004).

Si la protection de la ressource passe d'abord par une connaissance fine de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques concernés, une bonne gestion doit également prendre en compte l'impact des activités humaines. Pour ne pas se limiter à une application aveugle du principe de précaution, générant des conflits d'usage contraires aux principes d'une gestion intégrée de la ressource, il est nécessaire de pouvoir quantifier ces impacts. C'est ce à quoi s'attache également le laboratoire Edytem à propos d'une activité, la spéléologie qui, si elle représente généralement peu de poids économique, reste indispensable à la bonne connaissance, et donc à une bonne gestion, du milieu karstique.

3.1.3 Mise au point d'un protocole d'étude d'impact de la fréquentation spéléologique sur la qualité des eaux karstiques captées

La pratique de la spéléologie amène à mettre directement en contact des individus avec l'aquifère karstique et notamment les drains vadoses ou noyés à écoulement concentré en rapport direct avec une source captée ou un forage A.E.P. (Alimentation en Eau Potable). La réglementation en vigueur en France et les attendus de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau imposent des normes de potabilité et de protection des captages de plus en plus drastiques, peu compatibles avec la nature même des aquifères karstiques, souvent peu filtrants et affichant une grande variabilité de leurs paramètres physico-chimiques, notamment dans les zones de montagne qui nous intéressent ici. Dans ces conditions, la fréquentation spéléologique de drains karstiques captés pour l'A.E.P. peut paraître *a priori* incompatible avec la préservation des paramètres de potabilité en deçà des seuils réglementaires. De ce fait, et en vertu du principe de précaution justifiant « *de limiter, encadrer ou empêcher certaines actions potentiellement dangereuses, sans attendre que leur danger éventuel soit scientifiquement établi de façon certaine* »[1], l'accès à certaines cavités actives faisant l'objet de captages A.E.P. a été interdit par le gestionnaire dans le cadre de la mise en œuvre des périmètres de protection réglementaires. De telles interdictions affectent un nombre grandissant de massifs et départements « karstiques » en France (Buchot, 2003), particulièrement en zone de montagne. C'est notamment le cas du massif des Bauges en Savoie ainsi que du Vercors méridional (partie drômoise essentiellement). A l'origine de ces cas d'interdiction, on trouve des préconisations faites par les hydrogéologues agréés en charge de l'établissement des périmètres et mesures réglementaires de protection des captages, reposant sur des arguments désignant les spéléologues comme source potentielle (voire présentée comme avérée dans certains rapports) de pollution de l'eau captée.

Face au manque de données scientifiques étayant cet argumentaire, le laboratoire Edytem s'est donc proposé d'examiner l'impact réel de la fréquentation spéléologique sur la potabilité des eaux souterraines captées, en élaborant une méthodologie d'étude d'impact opérationnelle et reproductible, adoptable par les bureaux d'étude spécialisés. Rendre accessible un moyen simple et relativement peu onéreux d'apprécier précisément et au cas par cas l'impact de la pratique spéléologique sur un captage permettra en effet de

[1] Roger C. (2000): « Analyse de risque et principe de précaution: vers de nouveaux rapports "connaissance" / "politique"? », INRA Département ESR, mars 2000, en ligne: *http://www.inra.fr/Internet/Departements/ESR/comprendre/js/risque.php#source*

s'affranchir de l'application aveugle du principe de précaution, lequel ne se justifie à l'origine (dans le cadre du *Sustainable Development* défini dans le rapport Bruntdland en 1987) qu'en l'absence de données ou moyens d'investigation scientifiques disponibles adaptés aux enjeux sociaux et économiques en balance.

Après avoir établi et testé un protocole expérimental dans le massif des Bauges en Savoie (Franchiolo, 2000), le laboratoire a signé une convention d'étude avec la Fédération Française de Spéléologie pour développer et appliquer cette méthodologie en phase opérationnelle sur des cavités du sud-Vercors actuellement frappées d'interdiction de pratique spéléologique. L'idée est de faire travailler ensemble les gestionnaires (collectivités territoriales notamment), les spéléologues et les scientifiques de manière à faire connaître et valider cette méthodologie et favoriser l'acceptation des résultats par toutes les parties et leur utilisation en vue d'une gestion raisonnée de l'accès à la ressource, notamment en intégrant le cas échéant les notions de seuil de fréquentation et de distance de sécurité. Cette méthodologie doit donc permettre d'évaluer non seulement l'impact de la fréquentation spéléologique, mais en corollaire, le degré de vulnérabilité du captage par rapport à cette pratique et les seuils pertinents relatifs aux modalités de la fréquentation (distance et capacité de charge).

Ce protocole, que nous baptisons de l'acronyme PEIPSEK (**P**rotocole d'**E**tude d'**I**mpact de la **P**ratique **S**péléologique sur les **E**aux **K**arstiques) peut être décomposé en quatre points:

- Une étude préalable des caractéristiques physiques et anthropiques du site pour déterminer la sensibilité de la ressource et son état initial avant expériences.

- Une analyse par traçage du temps de transfert des eaux entre le point de contact spéléologues / actif souterrain et le point de captage.

- Une étude *in situ* de l'impact de la fréquentation spéléologique sur deux paramètres principaux de potabilité de l'eau : bactériologie et turbidité.

- Une interprétation des résultats en termes d'impacts sur la ressource.

Le détail du protocole PEIPSEK ainsi que ses premières mises en œuvre ont été présentés à Sorèze (Tarn) à l'automne 2004 à l'occasion des Assises Nationales de l'Environnement Karstique (Hobléa et Picollier, à paraître).

3.2 Contribution à la préservation et la valorisation des paysages et sites karstiques à forte valeur patrimoniale

Nous nous plaçons ici dans le contexte de sites reconnus, appropriés et « patrimonialisés » par la collectivité (label « Grand site de France » par exemple à Orgnac), faisant l'objet d'une fréquentation touristique directe (aven d'Orgnac) ou indirecte (espaces de restitution comme celui en projet de la

Grotte Chauvet) et supports d'activités pédagogiques. Soulignons, sans le développer, que le laboratoire Edytem participe également à l'inventaire, la révélation et la caractérisation des sites karstiques remarquables sur un plan patrimonial, notamment en partenariat avec des établissements universitaires de pays où tout ou presque reste à faire dans ce domaine (Liban, Chili, Indonésie, etc.).

3.2.1 Recherches sur les sites endokarstiques à forte valeur patrimoniale

Ces recherches sont résolument pluridisciplinaires pour un même site, depuis la cartographie géomorphologique et la sédimentologie des remplissages jusqu'à l'étude de la fréquentation touristique en passant par l'hydrologie souterraine, les calages chronologiques par datations et l'historique des usages anthropiques du site. Ces études nécessitent de prendre en compte le contexte physique et humain et s'élargissent donc au besoin à la géologie et géomorphologie de surface ainsi qu'au diagnostic territorial et à l'examen du contexte juridico-administratif. Le souci est de faire le lien entre tous ces aspects, et c'est en général l'entrée « patrimoine » qui le permet.

Prenons à titre d'exemple les études menées sur le secteur des Gorges de l'Ardèche : réputées et attractives bien au-delà des frontières françaises, les gorges de l'Ardèche et leurs bordures abritent un grand nombre de grottes à forte valeur esthétique et archéologique, dont deux pôles phares : l'Aven d'Orgnac et la grotte Chauvet.

L'aven d'Orgnac

L'aven d'Orgnac est réputé pour le gigantisme de ses galeries et son concrétionnement, à la fois très volumineux et riche en formes de détail remarquables (foisonnement d'excentriques). Ouvert de longue date aux visites touristiques - actuellement de l'ordre de 130 000 entrées annuelles - il a récemment fait l'objet d'une opération « Grand Site de France ». Cette procédure permet de financer, grâce essentiellement à des fonds d'Etat, des travaux de requalification des sites et en particulier de réduction des impacts environnementaux liés à la surfréquentation. A cette occasion, les gestionnaires du site et de l'opération Grand Site ont souhaité que des études scientifiques poussées soit menées sur le réseau d'Orgnac. Il s'agit d'abord d'apporter des éléments utiles à sa gestion et son exploitation en étudiant notamment le fonctionnement aérologique et hydrologique, la partie touristique étant sujette par endroits à des accumulations de CO_2 et à des ennoiements exceptionnels. Cette mission a été confiée à F. Bourges (cabinet privé Géologie-Environnement-Conseil) et A. Mangin (Laboratoire souterrain CNRS de Moulis). Il s'agit en outre de produire des éléments pouvant être insérés dans la présentation de la grotte aux visiteurs, et notamment au public scolaire qu'il s'agit d'attirer en plus grand nombre (classes vertes…) en liaison avec la présence sur le site du Musée Régional de Préhistoire. C'est à cet effet qu'Edytem, en collaboration avec le Cerak (Y. Quinif, Ecole Polytechnique de Mons, Belgique) a été chargé d'une étude géomorphologique destinée à reconstituer et si possible dater le scénario de mise en place du réseau et ses liens avec la morphogenèse externe, notamment la mise en place et l'évolution du creusement du réseau hydrographique encadrant (gorges de l'Ardèche, Cèze, etc.). Cette étude repose sur une cartographie morphologique très fine du réseau, faisant appel aux dernières techniques et outils de représentation

3D (figure 1), des études sédimentologiques poussées sur des carottages « profonds » et des datations isotopiques U/Th. Parallèlement, est menée une étude des modalités d'exploitation du site et de ses implications territoriales. Les premiers résultats de ces travaux ont fait l'objet d'un rapport intermédiaire (Delannoy et Jaillet, 2004) et ont été présentés en conférence publique. Nous nous intéressons pour notre part à la façon dont le gestionnaire va utiliser ces résultats scientifiques pour optimiser le fonctionnement du site et enrichir l'offre à la clientèle par le biais de ce que l'on peut appeler des produits dérivés. Une exposition intitulée « le calcaire et l'eau » a déjà été tirée de ces travaux (figure 2), accueillie en premier lieu sur le site, qui a gardé à demeure quelques panneaux intégrés au nouvel espace d'accueil de la grotte réalisé dans le cadre de l'opération Grand Site.

La grotte Chauvet

La grotte Chauvet, qui s'ouvre sur les flancs du cirque d'Estre dans un méandre des gorges de l'Ardèche, est mondialement réputée pour ses peintures pariétales abondantes et d'une qualité graphique d'autant plus frappante qu'elles sont les plus anciennes connues. Une étude scientifique, centrée sur l'archéologie et l'art rupestre, a été confiée (sur appel d'offre européen lancé par le Ministère de la Culture et de la Communication) à une équipe pluridisciplinaire dirigée successivement par J. Clottes puis J. M. Geneste (Centre National de Préhistoire). Un volet de cette étude est consacré à la vulnérabilité des éléments patrimoniaux (peintures, vestiges au sol, ossements de faune fossile…), où l'on retrouve l'implication du Laboratoire Souterrain de Moulis (A. Mangin) et de Géologie-Environnement-Conseil (F. Bourges) en tant que prestataires de service pour la partie aérologie et interface roche/écoulement d'eau, en association avec le laboratoire Edytem (Y. Perrette) pour ce dernier point. Une étude morphologique sous la direction de J.J. Delannoy applique les mêmes techniques qu'à Orgnac en travaillant notamment à échelle très fine pour mettre en évidence l'utilisation de la configuration des formes de dissolution par les peintres préhistoriques. Les apports de l'étude géomorphologique à la compréhension de cette grotte à forte valeur patrimoniale sont détaillés dans un article à destination de la revue *Karstologia* (Delannoy *et al*., 2004). Comme à Orgnac également, les conséquences territoriales de cette découverte majeure qu'est la grotte Chauvet font l'objet d'une étude dans le cadre de la thèse de M. Duval (sous la direction de Ch. Gauchon).

Cette approche pluri- et transdisciplinaire d'investigation et d'expertise des sites patrimoniaux karstiques se structure ainsi en une méthodologie éprouvée, reposant sur une approche systémique et appliquée par Edytem dans d'autres sites, notamment celui de la Voie-Sarde/système karstique des Echelles (PNR de Chartreuse, Savoie). Ce site-atelier du laboratoire présente un fonctionnement hydrologique intéressant (monitoring en cours) ainsi qu'un patrimoine paléogéographique, historique et paysager valorisé sur le plan touristique, et présentant une certaine vulnérabilité vis-à-vis du fonctionnement hydrologique. Ces études mobilisent donc plusieurs membres du laboratoire, ainsi qu'un grand nombre d'étudiants de Master. Elles ont de plus, parmi leurs vocations, le souci d'être utilisables par les gestionnaires des sites pour l'élaboration de produits dérivés, supports d'accueil de visites touristiques et d'activités pédagogiques. Mais l'élaboration de ces produits dérivés peut elle-même constituer un objet de recherche appliquée à la gestion durable des espaces karstiques.

3.2.2 Recherche-action sur les méthodes et outils de valorisation touristique et pédagogique du patrimoine karstique

L'éducation à l'environnement, devant induire une sensibilisation à la richesse et à la protection des ressources territoriales, est aujourd'hui largement considérée comme un vecteur fondamental dans la mise en œuvre du développement durable. Nous considérons et travaillons à démontrer que le milieu karstique et les ressources patrimoniales qu'il contient forment un support parmi les plus favorables à la mise en œuvre d'actions d'éducation à l'environnement. Notre démonstration repose entre autres sur la participation effective à de telles actions, en y incluant une dimension « recherche » à deux niveaux : intégration des données scientifiques issues de la recherche sur le karst, et recherche sur la conception et le contenu de ces outils, l'adéquation forme-fond, leur mode de diffusion et leur impact sur les publics destinataires et les sites d'accueil. Nous entrons ainsi dans le champ de la culture et médiation scientifiques, terrain sur lequel nous pensons que les laboratoires de recherche ont à s'engager de manière forte et durable, en délégant notamment un chercheur volontaire et intéressé pour faire le lien entre les travaux du laboratoire et les médiateurs professionnels chargés de la maîtrise d'œuvre des outils et supports pédagogiques et touristiques. Citons quelques unes de ces réalisations concernant le karst, ayant fait l'objet d'un tel partenariat entre karstologues d'Edytem et maîtres d'œuvre ou maîtres d'ouvrage :

Sentiers d'interprétation

Sentier des Tannes et des Glacières du Margériaz en collaboration avec le Parc Naturel Régional du Massif des Bauges en Savoie (Hobléa, 1999), sentier des Sciences de la Terre sur le site des grottes touristiques de Choranche (Vercors, Isère), etc.

Musées

Implication dans des musées de site et espaces de restitution : contribution à la conception et au suivi scientifique du Musée de l'Ours des cavernes d'Entremont-le-Vieux (Parc Naturel Régional de la Chartreuse, Savoie), conception des vitrines exposant au public la mise en place du réseau souterrain d'Orgnac dans la galerie-salle d'attente des visites touristiques de l'Aven…

Expositions

Exposition « Le calcaire et l'eau » (Musée Régional de Préhistoire d'Orgnac), « Les secrets du Granier » (Centre de Culture Scientifique et Technique de Chambéry)…

Films documentaires

Participation à de nombreuses productions de films documentaires pour la télévision (sur les grottes Chauvet, de Choranche, de la Balme…) ou spécifiquement tournés pour des espaces de restitution (film 3D sur la Balme à Collomb pour le Musée de l'Ours des cavernes), ainsi qu'à des sujets de magazines télévisés scientifiques ou sur la thématique Nature (émissions « C'est pas Sorcier », « Ushuaïa Nature », « Les Nouveaux Mondes », etc.).

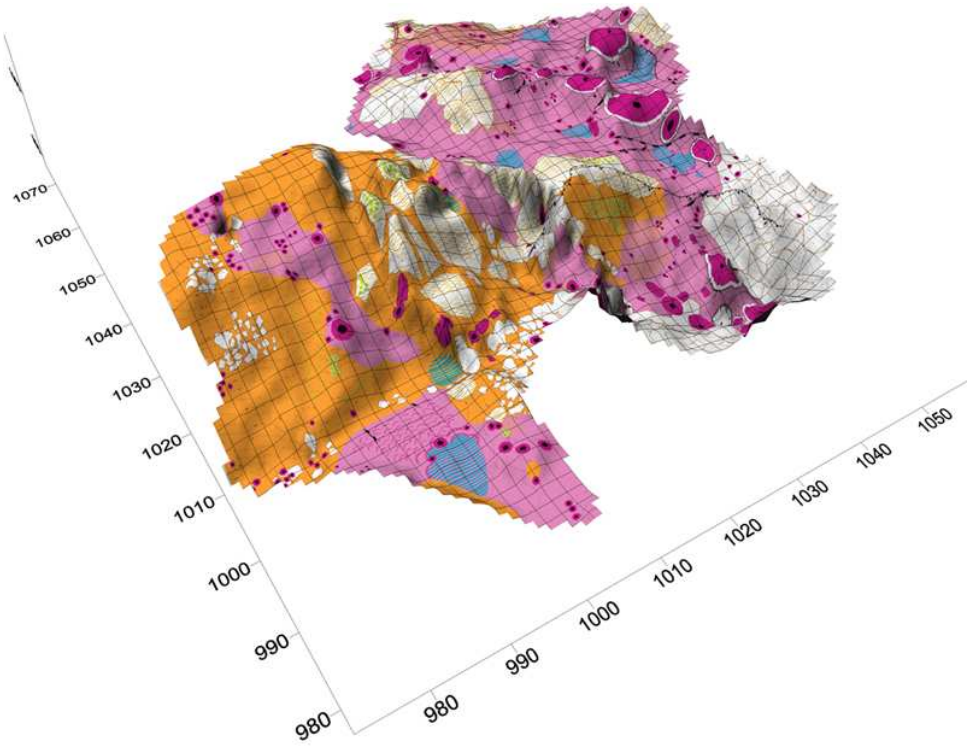


Figure 1: Carte morphologique 3D de la salle 2 dans l'aven d'Orgnac (réalisation B. Sadier, Edytem) dont l'intérêt est scientifique (rapports forme-processus) et pédagogique (visualisation facilitée).

Figure 2: Affiche de l'exposition grand public sur le karst, qui a associé étroitement les chercheurs d'Edytem et les médiateurs du Musée Régional de Préhistoire d'Orgnac.

Cycles de conférences

Années thématiques de l'UNESCO, événements nationaux type « Sciences en Fête » et autres, rapports d'étape ou de conclusion d'un programme de recherches scientifiques, festivals et programmes d'animation locale en saison touristique, sont autant d'occasions de sollicitations pour des conférences grand public sur la thématique des eaux et des paysages karstiques, prétextes à faire découvrir et donner les clefs de compréhension de ce milieu méconnu. Quelques titres sont évocateurs de l'esprit dans lequel ces conférences sont envisagées par les karstologues d'Edytem, qui interviennent souvent à plusieurs voix dans la même soirée : « L'eau et ses mémoires souterraines », « Les eaux souterraines en pays calcaire », « Le site naturel et historique de la Voie sarde et des Grottes des Echelles », « Le patrimoine naturel des gorges du Guiers-Mort », « Les mondes souterrains », « Les ours de la Balme à Collomb », « Connaissance et valorisation du karst de Chartreuse. », etc.

Ouvrages et articles grand public et pédagogiques

Il existe de nombreux articles de revues grand public ou junior (Sciences et Vie, Géo…) et ouvrages de vulgarisation scientifique qui, dans la lignée du pionnier Michel Siffre, présentent les grottes, le karst et leur faune spécifique. Le plus souvent rédigées par des journalistes spécialisés, ces publications font cependant assez rarement appel direct à la plume des scientifiques travaillant sur le sujet, sauf évidemment quand ces derniers en sont les initiateurs et/ou les auteurs principaux (Lalou et Wenger, 1991 ; Wildberger et Preiswerk, 1997).

Belle exception en France, après celui écrit par les inventeurs de la cavité, citons le magnifique ouvrage paru sur la grotte Chauvet aux éditions du Seuil (Clottes, 2001), entièrement rédigé par des membres de l'équipe scientifique qui travaille sur le site, succès de librairie qui démontre que des chercheurs peuvent produire un ouvrage de vulgarisation attractif. Les guides touristiques peuvent aussi insérer dans la présentation d'un site un encart « scientifique » rédigé par un spécialiste des lieux. L'édition 2003 du Guide Vert Michelin Alpes du Nord présente ainsi, à propos des grottes de Choranche, le sentier des sciences de la Terre et l'étude des concrétions comme enregistreurs environnementaux.

Mallettes pédagogiques

Ces outils très répandus dans le milieu scolaire et para-scolaire n'avaient jamais avant le début des années 2000 fait l'objet en France de productions spécifiquement consacrées au karst. C'est depuis peu chose faite avec une mallette éditée par l'Association de Gestion des Espaces Karstiques, structure associative pilotée par le Comité Départemental de Spéléologie de l'Ain en partenariat avec les collectivités locales. Consacrée à « L'eau en pays calcaire : les secrets du milieu souterrain », cette mallette est en prise directe sur les programmes scolaires des écoles primaires, collèges et lycées. Son contenu, auquel Edytem a contribué, fait la part belle aux outils multimédia (cassette vidéo, CD-Rom) en plus des classiques fiches pédagogiques.

Animations sur site et classes d'école

L'intervention des chercheurs directement auprès d'un public ciblé dans le cadre de visites de sites ou d'espaces de restitution peut s'avérer particulièrement marquante en termes de sensibilisation et d'appropriation cognitive. Se rendre physiquement dans les classes d'écoles procède de la même démarche et sera d'autant plus efficace que l'intervention s'inscrit dans un projet pédagogique associant l'exposé en classe à une sortie de terrain (photo : quatrième page de couverture) et des manipulations ou modélisations (à l'aide par exemple d'une mallette pédagogique). Cette implication des chercheurs sera également d'autant plus pertinente qu'elle contribue à animer un sentier d'interprétation, un musée de site ou un espace de restitution, parfois ceux-là mêmes que le chercheur aura contribué à bâtir ou concevoir.

Conceptions d'outils de représentation et d'interactivité

Maquettes, blocs-diagrammes 3D réels ou virtuels (format numérique), « manips » expérimentales grand public, posters, clips vidéo sont autant d'outils que le scientifique du karst peut contribuer à produire et valoriser dans le cadre des actions ci-dessus énumérées (expositions, conférences, animations, publications…).

Conclusions

Il y a ainsi fort à faire pour le chercheur motivé dans le domaine de la médiation scientifique sur le thème du karst. Se posent alors les problèmes corollaires de la disponibilité et de la reconnaissance de ces actions dans la carrière des intéressés, la médiation (« vulgarisation ») étant encore considérée par beaucoup comme un « art mineur » de la science, du superflu effectué « à temps perdu » par des chercheurs n'ayant pas grand-chose d'autre à faire valoir. Si la tâche est ainsi valorisante vis-à-vis du public (ce qui n'est pas sans jouer sur l'attitude de ses détracteurs), elle reste donc souvent ingrate vis-à-vis d'un milieu scientifique enclin en France à l'indifférence, l'incompréhension voire le mépris quand ce n'est la jalousie, et dont les instances dirigeantes ne sont pas prêtes à reconnaître la valeur autrement que par des déclarations d'intention. La demande sociale ne cesse cependant de croître et il est temps, pensons-nous, de donner à la médiation scientifique un statut au sein de la recherche française digne de la hauteur de sa mission en tant que vecteur d'éducation citoyenne elle-même fondement du développement durable.

4. Conclusion : une implication des scientifiques possible et souhaitable à tous les niveaux du processus de gestion

Il découle de tout ce qui précède que les scientifiques (ici du milieu karstique, mais ceci est extensible à d'autres contextes) peuvent et devraient être impliqués dans chaque niveau d'action du processus de gestion intégrée d'une ressource patrimoniale, à savoir :

- Connaissance et évaluation : exploration, inventaire, étude des gisements et de leur origine, du potentiel utilisable et de la vulnérabilité ;

- Exploitation, valorisation : extraction, distribution, aménagement, mise en tourisme ;

- Préservation : protection, remédiation ou réhabilitation, surveillance, sensibilisation des usagers ;

- Coordination et organisation : pour couvrir les besoins, s'adapter aux fluctuations de «l'offre» et de la demande, assurer un partage équitable (éviter les conflits d'usage) et la pérennité de la ressource ;

- Information entre les divers acteurs et porter à connaissance du public : structuration et diffusion de l'information sur les normes et réglementations, l'état quantitatif et qualitatif, la vulnérabilité, le détail et l'explication des coûts, les bonnes pratiques, les aspects culturels et pédagogiques, les retombées territoriales. C'est ici qu'intervient la médiation scientifique et technique.

Cette médiation scientifique doit désormais pouvoir être considérée, dans le contexte actuel, comme un champ d'investigation à part entière pour la recherche et les chercheurs désireux d'y consacrer une grande partie de leur activité. Il semble préférable pour cette entreprise que le lien avec la pratique de la recherche de pointe sur l'objet ou la thématique médiatisés ne soit pas rompu, ce qui implique que le chercheur reste actif dans des programmes de recherche fondamentale ou appliquée.

Le milieu karstique s'avère un support très pertinent pour la pratique de l'éducation à l'environnement. De ce fait, la recherche sur les finalités, concepts, outils, méthodes et impacts socio-économiques de la médiation scientifique sur le karst mérite de devenir à ce titre une branche à part entière de la discipline karstologique, faisant nécessairement le lien entre toutes (structure, fonctionnement, évolution et mémoires, paléontologie et archéologie, biologie, aménagement et anthropisation, exploitation valorisation, préservation, vulnérabilité et risques). Elle peut ainsi espérer intégrer, au même titre que l'expertise scientifique, la panoplie des outils pour une gestion durable de l'environnement karstique.

Bibliographie

Buchot R. (2003). *Les conflits d'usage liés à la fréquentation spéléologique dans les aquifères captés*. T.E.R. de Maîtrise, Université de Savoie. 69 p.

Clottes J. (2001). *La grotte Chauvet. L'art des origines*. Coll. Arts Rupestres. Seuil, Paris, 226 p.

Delannoy J.J., Jaillet S. (2004). *Aven d'Orgnac: étude spéléogénique et karstogénique ; étude des mémoires paléogéographiques et paléoenvironnementales du Bas-Vivarais*. Rapport d'étape n°1. Edytem – Université de Savoie – CNRS, 192 p.

Delannoy J.J., Perrette Y., Debard E., Ferrier C., Kervazo B., Perroux A.S., Jaillet S., Quinif Y. (2004). Intérêt de l'approche morphogénique pour la compréhension globale d'une grotte à haute valeur patrimoniale : la grotte Chauvet (Ardèche, France), *Karstologia* 44, 25-42.

Franchiolo C. (2000). *Contribution à l'étude de l'impact de la pratique spéléologique sur la qualité des eaux souterraines dans un système karstique*. T.E.R. de Maîtrise, Université de Savoie, 64 p.

Guyomard A. (2004). Un exemple de contrat de recherche industriel. *Sciences de l'Homme et de la Société* 71, 53-54.

Hoblea F. (1999). *Contribution à la connaissance et à la gestion environnementale des géosystèmes karstiques montagnards : études savoyardes*. Thèse doctorat d'Université. Lyon 2, 995 p.

Hoblea F., Picollier J. (à paraître). Etude d'impact de la pratique de la spéléologie sur la qualité des eaux souterraines karstiques captées – présentation de la démarche et du protocole mis en œuvre en Savoie et dans le sud-Vercors, in : *Assises Nationales de l'Environnement Karstique, Sorèze, 25-26 septembre 2004*, Comité de Spéléologie Régional Midi Pyrénées.

Lalou J.C., Wenger R. (1991). *Dans les cavernes du monde*. Mondo, Lausanne, 155 p.

Wildberger A., Preiswerk C. (1997). *Karst et Grottes de Suisse*, Speleo Projects, Bâle, 208 p.

La gestion durable de l'environnement karstique à travers l'activité touristique : le cas des grottes touristiques en France

Vincent BIOT,
Chargé de mission Sites de Découverte de la Nature en Rhône-Alpes, 69130 Ecully, France
Membre associé au laboratoire EDYTEM, université de Savoie 73376 Le Bourget-du-Lac, France,
vincent.biot@voila.fr

Résumé

Le milieu karstique est valorisé dans une volonté de développement touristique. A ce titre, les cavités naturelles sont l'objet d'aménagements lourds afin de les rendre accessibles au grand public. Leur aménagement implique une gestion du site qui doit s'inscrire dans la durabilité afin d'assurer la pérennité de cette forme d'exploitation touristique. Dans un premier temps, nous présentons les deux grands modèles d'aménagement de cavités naturelles. Nous montrons ensuite comment la pratique touristique dans les cavités aménagées pour le public peut s'inscrire dans la durabilité :

Durabilité environnementale, qui participe à une gestion et à des aménagements soucieux de préserver le milieu naturel permettant une conservation du site ; **durabilité fonctionnelle,** qui participe à l'entretien et à la maintenance des équipements en état et permet d'assurer l'attractivité du site ; **durabilité temporelle,** qui caractérise le tourisme souterrain : cette forme d'exploitation touristique est en effet très ancienne.

La gestion de ces cavités est complexe car il s'agit de concilier une exploitation touristique, et donc d'assurer la rentabilité économique, avec la conservation d'un milieu naturel. En effet, celui-ci doit rester attractif afin que le « produit touristique », lui aussi, soit préservé.

Abstract

Karst areas are promoted by tourist development. For this reason, natural caves are often heavily altered to make them more accessible for the general public. In order to insure the durability of the site or landform, the development must be managed in a sustainable manner. This study presents two main cave development models. We will then study how the tourist activity of those caves adapted or made available to the general public ensures durability:

environmental sustainability participating in sustainable management and eco-friendly modifications, thus permitting site conservation; **functional durability** contributing to the upkeep and maintenance and thus insuring site attraction; **temporal sustainability** which characterises underground tourism by the duration of its form and therefore positioning itself as one of the oldest tourist activities.

These three declinations of sustainability highlight the complex relationship or conciliation between a tourist activity requiring economical profit and the conservation of a natural site. Indeed, karst areas are the origin of a "tourist product" which must be preserved in order to remain attractive.

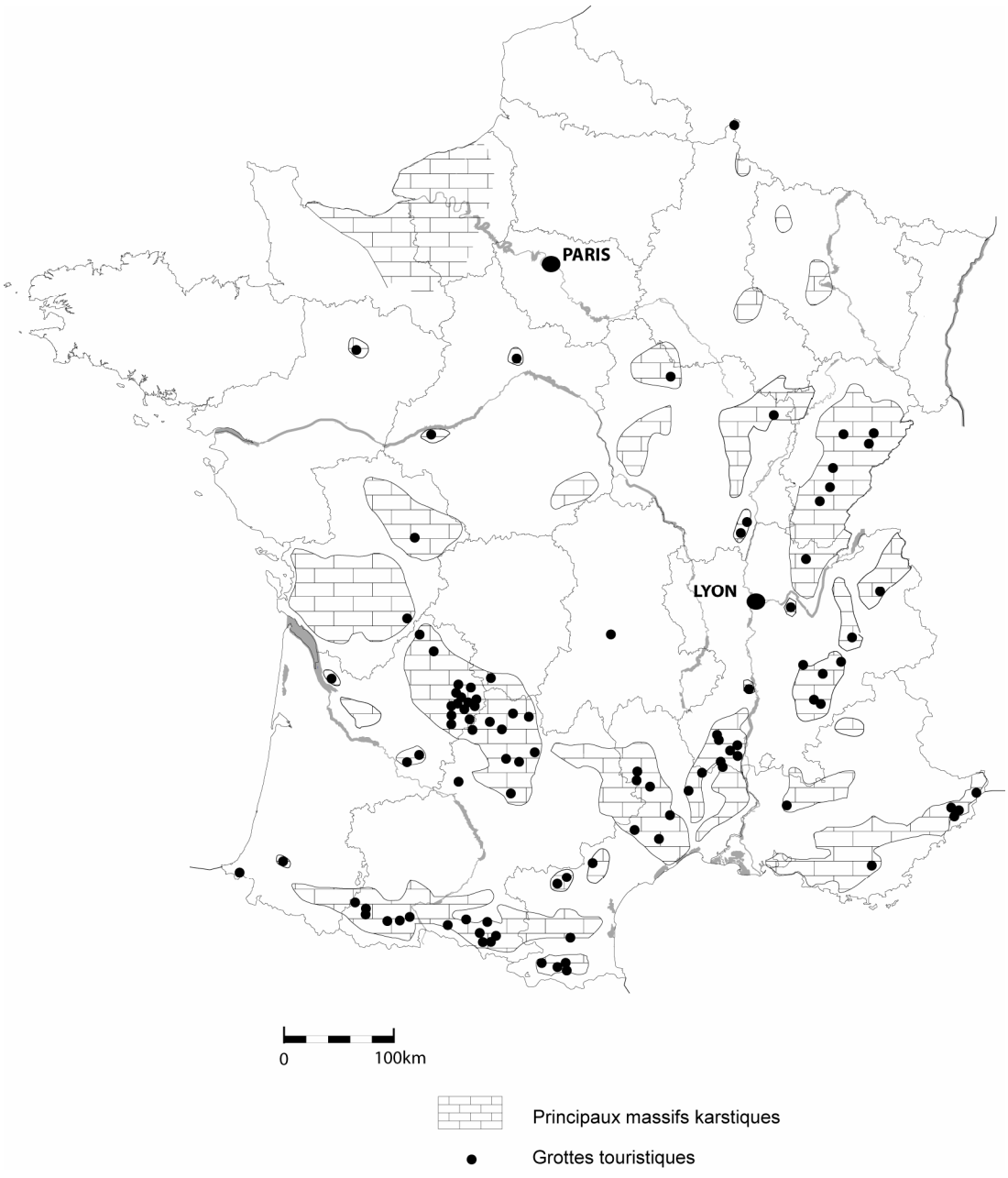


Figure 1: Principales grottes touristiques de France

1. Introduction

Comme de nombreux sites naturels, les grottes et les gouffres gagnent au fil des décennies les faveurs de quelques passionnés, puis rapidement d'un public plus large. Les grottes deviennent alors des sites touristiques et leurs aménagements leur confèrent une renommée régionale ou nationale voire internationale. L'exploitation touristique des cavernes est initiée au XIXème siècle. Elle s'organise ensuite durant le XXème siècle et propose aujourd'hui 99 cavités touristiques aménagées pour le public en France (figure 1). Cet ensemble n'inclue pas les excavations comme les mines, ensembles troglodytiques, baumes, catacombes, caves et carrières souterraines qui, par ailleurs, peuvent être également l'objet d'exploitations touristiques.

Cette contribution propose de présenter les deux grandes formes d'aménagement que peuvent initier l'activité touristique souterraine utilisant le karst comme support (Panizza 2003). Nous nous intéressons ensuite plus particulièrement aux grottes touristiques aménagées pour le public. Puis, nous observerons comment cette activité touristique s'inscrit dans la durabilité de sa forme.

2. Différentes formes touristiques d'aménagements karstiques

Nous distinguons deux types d'aménagements touristiques souterrains : ceux à caractère non marchand (entrée libre) et ceux à caractère marchand (entrée payante) (figure 2). Les cavités connues seulement des spéléologues ou qui sont l'objet d'une pratique de guidage, et qui ne sont pas le fruit d'une pratique touristique grand public, n'entrent pas dans ces ensembles.

2.1 Cavités naturelles aménagées à entrée libre

Ces types de cavité sont des lieux où des installations ont permis de faciliter l'accessibilité au site : seuls les accès sont aménagés ; le parcours souterrain n'est ni sécurisé, ni éclairé.

En raison du caractère souvent spectaculaire de certains phénomènes karstiques, lieux de promenades et d'excursions, leur accès a bien souvent été facilité à travers la réalisation de quelques aménagements. Dans le département du Doubs, les sites des résurgences du Lison et de la Loue ou encore de la grotte des Faux-Monnayeurs (figure 2) sont mentionnés dans le guide Michelin et sont accessibles librement et gratuitement par tous.

Cependant dans bien des cas, ces aménagements posent le problème de leur entretien. En effet, ils sont en place depuis plusieurs dizaines d'années et ont été essentiellement réalisés à l'initiative du Touring club de France, du Club

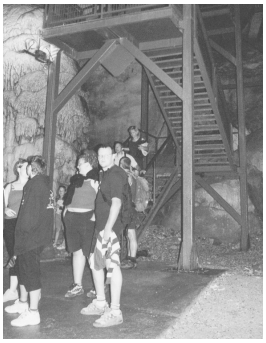
Types de sites	Types d'aménagement	
Cavités naturelles aménagées à ***entrée libre***	L'accès extérieur est aménagé (échelle, passerelle,...) mais le parcours souterrain reste libre et gratuit	Grotte des Faux-Monnayeurs (Doubs)
Cavités naturelles aménagées à ***entrée payante***	L'accès et le parcours souterrain sont aménagés. L'entrée à la cavité est sanctionnée par un droit d'entrée	 Grotte de Saint Marcel (Ardèche)

Figure 2 : Modèles de cavités naturelles aménagées

Alpin Français ou des municipalités (offices de tourisme). Le problème se pose aujourd'hui de leur fiabilité qui peut paraître bien douteuse, car s'ils ont été installés à une certaine époque, leur gestion et leur entretien dans le temps n'a pas toujours été l'objet d'un suivi régulier.

Parmi ces cavités, dont l'accès a été « touristiquement » amélioré, quelques-unes ont connu, plus tard, un aménagement de leur parcours souterrain et sont devenues des grottes à entrée payante. Le gouffre de Poudrey dans le Doubs illustre très bien cet exemple. A partir de 1904, l'installation d'une échelle à son entrée permettait d'accéder gratuitement dans la grande salle souterraine. Cette liberté d'accès s'acheva en 1926, année où, motivés par la présence proche du camp militaire de Valdahon, les propriétaires décidèrent d'organiser des visites et de les rendre payantes.

Une autre forme d'aménagement est le sentier karstique qui permet de découvrir librement et gratuitement un ensemble de phénomènes karstiques identifiés et variés. Une entreprise originale en la matière a été prise au sentier karstique du Grand Bois, à Merey-sous-Montrond dans le Doubs. Sous l'impulsion de la mairie et du club spéléologique local, le GCPM (Groupe Clostrophile du Plateau de Montrond), un premier sentier a été inauguré en 1991. Sur 1200 mètres, il donne accès gratuitement à différentes formations

karstiques. En 2001, une deuxième boucle a été réalisée (1600 mètres de long). La particularité de cette boucle est la non gratuité de son parcours. En effet, son cheminement se fait seulement accompagné et comprend le parcours d'une petite grotte aménagée pour la visite touristique (1300 visiteurs en 2002 et 2003). D'un développement modeste de 30 mètres, elle propose un concrétionnement diversifié. Cette deuxième boucle du sentier du Grand Bois mêle à la fois sentier de découverte karstique et visite touristique d'une petite grotte aménagée.

2.2 Cavités naturelles aménagées à entrée payante

La visite des cavités naturelles est payante, au même titre que des gorges aménagées avec des passerelles d'accès par exemple. Les cavernes touristiques exigent la mise en place d'aménagements lourds. Il faut tout d'abord préparer l'espace d'accueil extérieur. Cela se traduit notamment par la réalisation d'une route d'accès permettant la circulation des autocars et la construction d'un bâtiment d'accueil (billetterie, boutiques souvenirs, petites restauration,…). Une fois sous terre, la visite *in situ* de la cavité nécessite la réalisation, coûteuse, d'un cheminement interne, de son électrification et de sa sécurisation qui demande, de plus, un entretien régulier. Certains aménagements souterrains peuvent impliquer de lourds travaux. Quelques exemples sont présentés au chapitre suivant. La gestion commerciale (promotion et publicité), technique (entretien des équipements) et humaine (gestion du personnel, accueil du public, visites guidées) de tels sites a un coût. Sa rentabilisation ne peut être assurée que par la mise en place d'un droit d'entrée dont doit s'acquitter chaque visiteur.

3. Critères de durabilité du tourisme souterrain

L'intérêt de ce chapitre concerne les caractéristiques de durabilité de l'activité touristique des grottes aménagées. Si le terme de « durabilité » est ici pris dans un sens différent de celui communément admis (Teyssandier et Zysberg 2000), il a le mérite de poser la question de la conservation de la ressource touristique, de la pérennité de l'attractivité touristique d'un lieu et de l'héritage de la fonction touristique. En effet, si la fonction touristique des cavités naturelles s'est établie dans des contextes bien souvent définis, cela ne semble plus suffisant aujourd'hui pour assurer sa pérennité. Nous avons identifié trois formes de durabilité, que nous présentons ci-dessous.

3.1 Durabilité environnementale

Sachant que l'aménagement touristique d'une cavité porte atteinte au site, il faut alors réussir à concilier ses aménagements lourds tout en préservant le milieu souterrain. En effet, l'exploitation touristique ne doit pas défigurer le site afin qu'il conserve son attractivité (Mathieu et al., 1997). Le compromis n'est alors pas évident à établir. Comme le montre la figure 3, les atteintes peuvent être portés durant l'aménagement mais également durant l'exploitation du site. L'aménagement touristique d'une cavité naturelle implique des atteintes directes ou indirectes pour la cavité elle-même. Elles peuvent être aussi bien

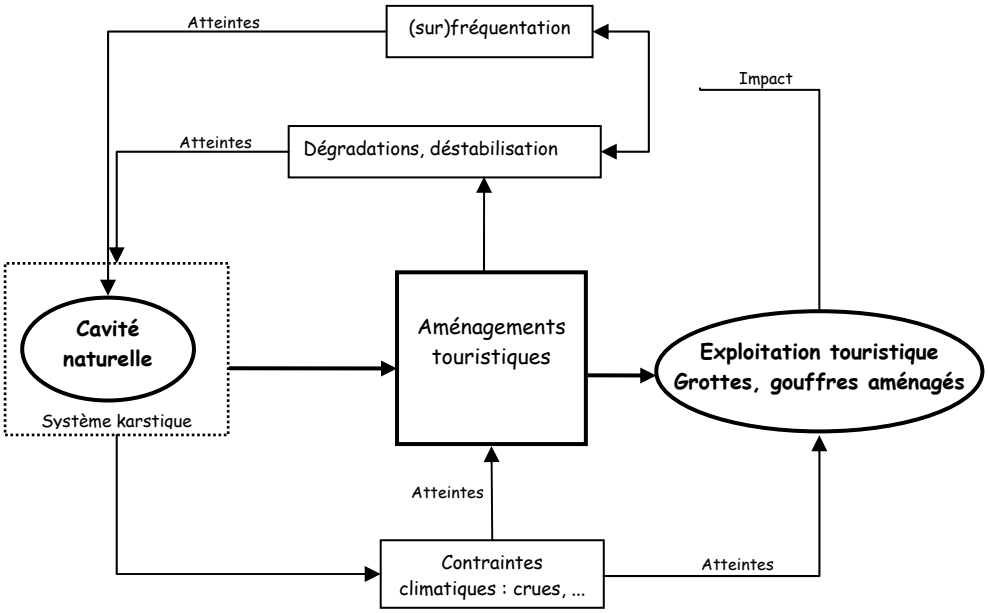


Figure 3 : Interactions entre la cavité naturelle et son exploitation touristique (d'après Reynard et al. 2003)

liées à la présence de visiteurs dans la grotte qu'aux travaux nécessaires à l'aménagement touristique. Cependant, si les responsables s'en donnent les moyens, ces atteintes peuvent être limitées. De plus, certains aménagements sont réversibles.

3.1.1 Aménagements nécessaires

L'aménagement d'une grotte nécessite de lisser le cheminement et de faciliter l'accès à la cavité. Différentes réalisations y participent (Biot 1996) :

- Le percement de tunnels : ils amènent directement le visiteur dans la cavité et contribuent à l'évolution du cheminement de visite. Ils permettent d'étendre le parcours de visite, à l'exemple de l'aménagement de la salle de la Cathédrale aux grottes de Choranche (Isère), qui a nécessité le percement d'un tunnel afin de relier la salle à la grotte, permettant ainsi le passage aux visiteurs et de prolonger la visite. Ils permettent également d'effectuer une visite en boucle, comme cela a été réalisé à la grotte de la Clamouse (*Hérault*), ou un tunnel en fin du parcours de visite permet d'accéder directement à l'extérieur sans refaire le parcours souterrain dans l'autre sens.

- La mise à gabarit de certains passages afin d'assurer une visite toujours debout. Ce type d'intervention participe au confort de visite et évite de progresser à quatre pattes comme cela pouvait se pratiquer jusqu'à la fin du XIXème siècle dans quelques cavités.

- La construction d'embarcadère dans les cavités : un parcours en barque sur une rivière souterraine est proposée, par exemple à la grotte de Labouiche en Ariège.

- La présence d'un petit train électrique qui permet de conduire directement les visiteurs dans les galeries aménagées pour la visite. Ce choix a été retenu à la grotte préhistorique de Rouffignac en Dordogne. Les visiteurs sont invités à descendre uniquement à certains endroits limitant leur déambulation dans la grotte.

- Les ascenseurs, qui remplacent les escaliers d'usage fastidieux pour le public. Deux ascenseurs assurent l'accès au gouffre de Padirac (75 mètres de profondeur) dans le Lot. L'un fonctionne dans les deux sens, à la montée et à la descente. L'autre est réservé à l'usage exclusif des visiteurs qui quittent le gouffre.

Si la mise à gabarit est irréversible, certains tunnels permettent d'éviter de calibrer des passages afin d'arriver dans la partie exploitable touristiquement. De la même manière, les matériaux et les techniques utilisées dans la réalisation du cheminement sont importants. En effet, leur choix aura une importance primordiale lors de la modification de parcours de visite si la volonté est de faire disparaître les traces de l'ancien cheminement. A l'aven d'Orgnac en Ardèche, de gros travaux de réaménagement (initiés par une opération Grand Site de France) ont entraîné la modification du parcours de visite. Ces travaux ont été facilités par la présence d'anciens escaliers de type escamotable qui ont pu être retirés ne laissant ainsi aucune marque de l'ancien parcours.

3.1.2 Gestion et impact de la fréquentation touristique

Une augmentation disproportionnée et surtout non maîtrisée de la fréquentation entraîne des conséquences fâcheuses voire irréversibles sur une grotte. L'exemple le plus célèbre reste celui de la grotte de Lascaux en Dordogne, qui nécessita sa fermeture au public en 1963. Il est difficile de connaître avec précision l'évolution de la fréquentation d'un site, par contre les connaissances scientifiques d'aujourd'hui permettent d'étudier différents facteurs physico-chimiques du milieu afin de définir les conditions de visite.

Dans le cas de cavités préhistoriques et /ou à cristallisations extrêmement fragiles, une étude de l'impact de la présence humaine dans la caverne est à réaliser (Cabrol et Gauquelin 2000). Lorsque les visites sont trop rapprochées ou les groupes admis trop importants, des perturbations de l'équilibre atmosphérique sont constatées surtout dans les moyennes et petites cavités. Ces perturbations peuvent provoquer l'assèchement des concrétions et l'endommagement des représentations rupestres ainsi que la dégradation de leur support. Afin d'éviter cette situation nuisible à la cavité et à son exploitation touristique, une étude climatique peut être réalisée afin de déterminer la capacité d'accueil. Des aménagements et un niveau de fréquentation compatible avec des conditions de conservation satisfaisantes sont alors définis (Vourc'h 1999). Un protocole de visite qui contingente la taille et le nombre de groupe peut être alors établi. Actuellement, sept cavités en France sont l'objet d'un contingentement du nombre de visiteur journalier.

3.2 Durabilité fonctionnelle

Une cavité touristique doit conserver son attractivité en assurant un suivi de ses équipements et de sa gestion. Sa pérennité sera assurée par un souci d'entretien de ses installations et de son amélioration en terme de prestations touristiques et en matière d'accueil du public. De cette manière, il s'agit de perpétuer la fonction touristique sur le territoire d'une grotte. Nous pouvons distinguer deux types de charge (Vourc'h et Natali, 2000). Tout d'abord, les charges directement liées à la fréquentation touristique, c'est-à-dire :

- L'entretien des dispositifs physiques d'accueil du public : parking, toilettes, signalétique, bâtiment d'accueil et/ou billetterie, etc. ;
- La sécurité : mise et maintien aux normes de sécurité des aménagements ;
- Les interventions curatives ou préventives de l'impact de la fréquentation : ramassage des ordures, nettoyages du site extérieur et de la grotte ;
- Le contrôle et le traitement de la « maladie verte » soit le développement d'algues et de mousses résultant de la photosynthèse et de la chaleur induites par l'éclairage nécessaire dans les cavités aménagées.

Ensuite, des charges d'entretien et de gestion du milieu naturel , c'est-à-dire :

- Maintenance de l'éclairage, entretien des équipements, du cheminement dans la cavité et de son accès
- De plus, des phénomènes climatiques peuvent entraîner leur lot de dégradations. Certaines crues violentes obligent à réinstaller l'ensemble ou une partie de l'éclairage et nettoyer, voire remplacer, des passerelles ou des rambardes.

3.3 Durabilité temporelle

La visite de cavités naturelles se caractérise par sa pérennité. Il s'agit d'une des formes les plus anciennes de pratique touristique (Pissard et Mantovani, 1997). Il existe peu d'exemples d'une telle continuité dans la carte actuelle du tourisme en France. Les premières entreprises d'aménagement de cavernes remontent à environ 200 ans avec les grottes de La Balme en Isère ou les grottes d'Osselle dans le Doubs. A la fin du XIXème siècle, l'aménagement spectaculaire du gouffre de Padirac dans le Lot inaugure une nouvelle phase et participe à l'engouement du public pour le milieu souterrain. Au fil du XXème siècle, d'autres cavités seront aménagées jusqu'à former un maillage de 97 grottes et gouffres touristiques en 2004. En plus d'un siècle, la visite de cavernes aménagées s'est inscrite dans la permanence d'un produit touristique, qui faisant preuve d'une grande adaptabilité aux exigences du public, a su attirer des touristes toujours plus nombreux.

Le tourisme souterrain a su profiter de conjonctures favorables à son essor (Biot et Gauchon 2001) :

- le thermalisme du XIXème et du XXème siècle ;
- les lieux de pèlerinage ;
- le développement du chemin de fer ;
- le développement de la pratique touristique avec, entre autres, le tourisme de « masse » ;
- des personnages médiatiquement présents comme E.A. Martel ;
- les découvertes spéléologiques ont également contribué à cet état de fait.

Cependant, le tourisme souterrain est vieillissant et il ne lui est plus suffisant de fonctionner sur ses acquis. La fréquentation dans les grottes touristiques françaises est en baisse. Quelques cavités arrivent à limiter cette dégringolade, mais ce n'est pas la majorité.

Depuis les années 1990, les exploitants de grottes aménagées ont amèrement constaté la désaffection de leur site : entre 1991 et 1998, ils ont accusé une baisse générale de 15% de la clientèle (Observatoire Nationale du Tourisme, 2002). Depuis 1998, cette baisse tend à se stabiliser et la fréquentation est marquée par une stagnation du nombre de visiteurs. Mais la tendance actuelle (depuis 2003) est de nouveau à la baisse. Aujourd'hui, de nombreuses incertitudes pèsent sur l'attractivité des cavités naturelles (Contreau 2001). S'il semble que l'apparition récente d'autres sites touristiques en tous genres peut être impliquée dans la baisse de fréquentation constatée, elle ne suffit pas à expliquer à elle seule ce phénomène. Les grottes touristiques vont devoir faire preuve d'innovation et cela aussi bien au niveau de la conception des visites qu'au niveau de leur promotion et de l'image identitaire qu'elles vont véhiculer (Biot et Gauchon 2002).

En effet, les grottes touristiques souffrent d'une image sclérosée et surtout d'un problème de distinction. Pour la majorité des visiteurs, en parlant d'une cavité aménagée pour le tourisme*,« une fois que l'on en a vu une, on les a toutes vues!».* Il est primordial que les cavernes arrivent à se positionner les unes par rapport aux autres. Cela est d'autant plus important lorsqu'elles se situent sur un territoire les mettant en situation concurrentielle. Ainsi, elles doivent plutôt rechercher la complémentarité tout en mettant en exergue leur spécificité. Dans ce souci de faire ressortir une identité propre, une étude sur les grottes des Echelles en Savoie (Beauquis 2003) a permis de faire émerger le thème du passage sur lequel va se restructurer le site dans un avenir proche : ce thème est fédérateur tant à un niveau historique (au XVIIème siècle, l'aménagement de la route reliant les Echelles à Chambéry favorisa les échanges entre Lyon et l'Italie), que géographique (zone de transition et de contacts entre le massif du Jura et le massif alpin de la Chartreuse), ou encore hydrologique (rôle de l'eau dans la formation des grottes)

Il s'avère également important de s'inspirer des nouvelles technologies et pratiques en matière de scénographie et de muséographie. Si les sons et lumières ont apporté une véritable valeur ajoutée dans les années 1980-90, de nouvelles voies doivent être explorées. Le réaménagement de la grotte de La Balme en Isère à l'automne 2004, qui fait justement appel à des techniques de scénographie, est novateur en la matière. La technologie participe donc au « renouveau » de cette grotte. Cependant, le discours de la visite guidée n'a pas évolué. Il n'est donc plus en harmonie avec cette nouvelle manière de présenter l'information scientifique.

Une autre possibilité existe également dans la mise en place de visites automatisées, c'est à dire se déroulant sans guide. La grotte de Baume Obscure dans les Alpes-Maritimes est pionnière dans ce domaine. Là aussi, des voies de renouveau sont à explorer même si ce type de visite ne peut sûrement pas être adapté à toutes les cavités.

La valorisation touristique d'une grotte et son exploitation reste une activité économique qui doit être rentable. Ainsi, la baisse constatée de la fréquentation des cavités a une conséquence directe sur la gestion et donc la conservation du milieu. En effet, les bénéfices tirés de l'exploitation permettent de participer à l'entretien du site et donc à sa durabilité. Si tel n'est pas le cas, les installations seront de moins en moins entretenues, entraînant le cas échéant la fermeture du site. Le problème se pose alors du devenir du site : soit se présente un repreneur qui réinvestira dans les aménagements et les installations de la grotte, soit la cavité va rester à l'abandon et deviendra une friche touristique (Gauchon 1997). Des exemples existent de cavités où les stigmates des aménagements sont toujours présents: cheminement bétonné, traces des équipements d'électrification, marches taillées.

Ce constat traduit bien l'absence de prise en compte de « l'après grotte touristique » lors des projets d'aménagement et d'exploitation. Ainsi, à travers le souci de conservation de l'attractivité du produit touristique « grotte » et donc de sa rentabilité économique, le tourisme souterrain participe bien souvent à la gestion durable d'une cavité.

La figure 4 reprend les atteintes liées au tourisme souterrain dont découlent les trois déclinaisons de la durabilité décrites précédemment. Nous structurons ainsi le tourisme souterrain autour de trois cycles de durabilité. L'ensemble de ces cycles contribue à maintenir ou à relancer l'attraction touristique d'une cavité naturelle

4. Conclusion

Nous avons mis en évidence les facteurs de durabilité du tourisme souterrain. Cependant, sa gestion est de plus en plus encline à des perturbations. Si rien n'est entrepris pour limiter les dysfonctionnements, la baisse, déjà amorcée, de la fréquentation touristique n'en sera que plus marquée. Toutefois, comme nous l'avons signalé dans notre contribution, des solutions existent pour enrayer cette évolution défavorable. Les exploitants de cavités touristiques l'ont bien compris.

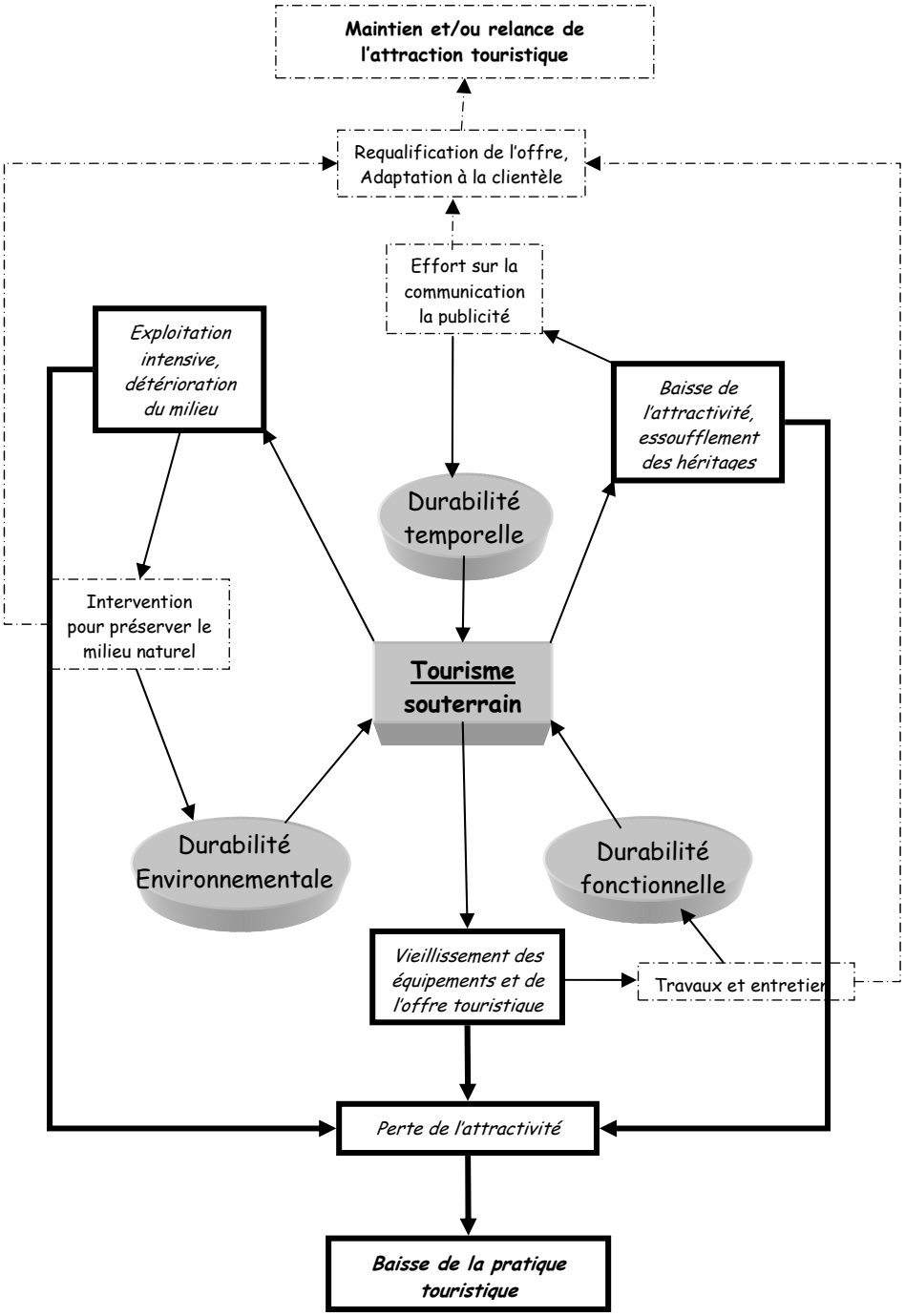


Figure 4 : Tourisme souterrain et durabilité à l'échelle d'une cavité

La relance du tourisme souterrain doit passer par une remise en question de l'organisation structurelle des visites de cavité. Cette réflexion doit être menée de façon collective et individuelle par les professionnels de l'activité touristique souterraine.

Les cavités naturelles ne sont pas les seules à souffrir d'une perte d'attractivité. D'autres sites, comme certains musées et écomusées, suivent la même tendance. De façon générale, les changements radicaux de la pratique touristique concernent l'ensemble des sites touristiques en tous genres. Ainsi les modifications dans la consommation de sites touristiques témoignent d'une évolution des attentes de la clientèle (Barron-Yellès, 1999). Si l'approche de la durabilité du tourisme souterrain nous a éclairés sur les caractéristiques de cette activité touristique, des études complémentaires sur d'autres pratiques touristiques (tourisme industriel, tourisme de jardins, …) devraient nous permettre d'approfondir nos connaissances sur l'activité et les pratiques touristiques et l'évolution de leur forme.

Bibliographie

Barron-Yellès N. (1999). *Le tourisme en France*, coll Territoires et Stratégies, Ed. A. Colin, 220 p.

Beauquis A. (2003). *Le site touristique de Saint-Christophe la grotte : diagnostics, analyses et perspectives d'avenir*, mémoire de maîtrise de Géographie, Université de Savoie, Chambéry, 279 p.

Biot V. (1996). *Aménagement des cavités naturelles*, mémoire de Maîtrise, Institut français d'Urbanisme, Paris VIII, 118 p.

Biot V., Gauchon C., (2001). La mise en tourisme du monde souterrain, in *La mise en tourisme des lieux et des espaces*, *Actes des XXVII*^{ème} *Journées de la Commission Nationale de Géographie du Tourisme et des Loisirs*, *la Rochelle, 3-5 mai 2000*, 61-74.

Biot V., Gauchon C. (2002). Le tourisme souterrain face à la nécessaire requalification de l'offre : constats, solutions, perspectives, in *Territoires et marchés*, *Actes du 2*^{ème} *colloque de Recherche en Tourisme de l'Association française des IUP Tourisme, Hôtellerie et Loisirs*, *12-14 septembre 2002,* Chambéry, 15

Biot V. (2003). *Etude géographique d'une forme ancienne de durabilité : l'exemple du tourisme souterrain*, Thèse de géographie, Université de Savoie, Chambéry, 18 décembre 2003, 317p.

Cabrol P., Gauquelin F. (2000). La fréquentation des grottes et préservation du patrimoine, in *Spelunca Mémoire, n° 25, Actes des 2èmes assises nationales de l'Environnement karstique, Valence, Drôme, 20-21 novembre 1999*, pp. 71-77

Contreau P. (2001). *Les cavités aménagées pour le tourisme en Rhône-Alpes : diagnostics, analyses et perspectives*, D.E.S.S. développement et promotion des aménagements touristiques, Université Lumière Lyon II, 186 p.

Gauchon C. (1997). *Des cavernes et des hommes*, Karstologia mémoire n°7, 248 p.

Mathieu J.-L., Deveze J., Duez M., Gautier G., Zysberg C. (1997). *Environnement et tourisme, un tourisme compétitif et durable grâce à un environnement préservé*, La Documentation française, 195 p.

Observatoire National du Tourisme (2002). *Les sites touristiques en France métropolitaine : fréquentation 1994-2000*, coll Analyse et perspective du tourisme n°74, 315 p.

Panizza M. (2003). Géomorphologie et tourisme dans un paysage culturel intégré, in *Travaux et Recherches n°24, Actes de la Réunion annu elle de la Société suisse de Géomorphologie*, *Finhaut, 21-23 septembre 2001*, Institut de Géographie, Lausanne, 11-18

Pissard I., Mantovani G. (1997). *Le tourisme souterrain en France*, Cahiers de l'AFIT, 60 p.

Reynard E., Holzmann C., Guex D. (2003). Géomorphologie et tourisme : quelles relations?, in *Travaux et Recherches n°24, Actes de la Réunion annuelle de la Société suisse de Géomorphologie*, *Finhaut, 21-23 septembre 2001*, Lausanne, Institut de Géographie, 1-10

Teyssandier J.-P., Zysberg R. (2000). Pour un pilotage du tourisme durable, éléments de méthode, in *Cahiers Espaces n°67* , 204-208

Vourc'h A., (1999). La capacité d'accueil, Une notion essentielle dans les sites naturels, in *Espaces n°166* , 18-22

Vourc'h A., Natali J.-M (2000). *Sites naturelles : contributions du tourisme à leur gestion et à leur entretien – Guide de savoir-faire*, AFIT, ONT, 139 p

Utilisation touristique de cavités karstiques dans des roches évaporitiques : le cas du Valais central (Suisse)

Jean-Pierre PRALONG
Institut de Géographie, Université de Lausanne
Quartier Dorigny, Bâtiment Humense
CH – 1015 Lausanne
Jean-Pierre.Pralong@unil.ch

Résumé

L'utilisation de sites karstiques superficiels comme souterrains à des fins touristiques ou de loisirs pose de multiples problèmes et contraintes en lien avec leur nature géologique et géomorphologique. Concernant l'exploitation touristique de cavités karstiques, la gestion des risques et la préservation des sites de même que leur mise en valeur et fréquentation semblent être les aspects majeurs à prendre en compte et à étudier. Ces enjeux prennent une dimension particulière lorsque ces espaces souterrains se sont formés dans des roches évaporitiques telles que le gypse ou l'anhydrite qui présentent un modelé de karstification accélérée.

Le présent article illustre cette problématique au travers de deux exemples situés dans un même contexte géographique et géologique (lac souterrain de *St-Léonard* et grotte de la *Crête de Vaas*, Valais central, Suisse), mais dont l'utilisation touristique est fort différente en raison du facteur « risque ». Ce dernier, lié à l'instabilité des voûtes et des parois ainsi qu'à la fréquentation des sites, engendre des conséquences à tous niveaux de l'exploitation : entretien, préservation du site, buts de l'exploitation, marketing, fréquentation, type de tourisme, rentabilité, projets. A partir de ces éléments, une stratégie de gestion durable commune aux sites étudiés est proposée, tenant compte de l'évaluation des modifications anthropiques et de leurs intérêts scéniques, scientifiques, culturels et économiques.

Abstract

The use of superficial and underground karstic sites for tourist and recreative purposes creates numerous problems and constraints linked to their geological and geomorphological characteristics. In regard to the tourist use of karstic caves, risk management and site preservation as well as optimization and number of visitors seem to be the major aspects to take into account and to study. These issues take on a particular dimension when these underground voids are formed in evaporitic rocks such as gypsum or anhydrite which present an accelerated form of karstification.

This paper illustrates this problematic with two examples located in the same geographical and geological context (the underground lake of *St-Léonard* and the cave of the *Crête de Vaas,* Valais, Switzerland). Their tourist use is very different in reason of the « risk » factor (instability of the walls and ceilings, number of visitors) which generates consequences at all levels of the exploitation : maintenance, site preservation, aims of exploitation, marketing, number of visitors, kind of tourism, profit earning, projects. With these elements, a strategy of durable and jointly management is proposed, taking into account assessment of anthropic changes and scenic, scientific, cultural and economic interests of the sites.

1. Introduction

L'utilisation de sites karstiques superficiels (exokarst) comme souterrains (endokarst) à des fins touristiques ou de loisirs pose de multiples problèmes et contraintes en lien avec leur nature géologique et géomorphologique (Reynard 2003 : 43-46, Salomon 2000 : 225), d'autant que les cavités naturelles – dont la très grande majorité est d'origine karstique – sont **les sites les plus utilisés d'un point de vue touristique** (D'Andrea et al. 2004). Leur intérêt économique potentiel a transformé bon nombre de cavités naturelles en cavités touristiques, portant leur total à environ 5'000 à travers le monde (D'Andrea et al., comm. orale).

Concernant leur exploitation touristique, la **gestion des risques** et la **préservation des sites** de même que leur mise en valeur et fréquentation semblent être les aspects majeurs à prendre en compte et à étudier. Ces enjeux prennent une dimension particulière lorsque ces espaces souterrains se sont formés dans des roches évaporitiques telles que le gypse ou l'anhydrite qui présentent un modelé de karstification accélérée (Nicod 1993 : 15). Dès lors, ces environnements ont **des perspectives d'avenir « limitées »** (Wildberger et Preiswerk 1997 : 186), permettant difficilement une pensée et une vision à long terme, ce qui implique une absence ou un déficit de gestion durable. A notre sens, une solution à cette lacune peut passer par la mise en adéquation de leur utilisation touristique avec leurs intérêts scéniques, scientifiques, culturels et économiques.

Le présent article illustre cette problématique au travers de deux exemples formés dans un même contexte géographique et géologique (lac souterrain de St-Léonard et grotte de la Crête de Vaas, Valais central, Suisse)[2]. Après une présentation de l'histoire de leur utilisation touristique, nous présentons une analyse comparée de leurs profils permettant de mettre en lumière le(s) facteur(s) qui conditionne(nt) leur type de gestion et d'exploitation. Nous terminons en proposant un modèle de gestion durable et commun de ces environnements, dont les problèmes spécifiques sont accentués par rapport aux cavités karstiques formées dans des roches calcaires.

2. Présentation des sites d'étude

2.1 Contexte géographique

Le lac souterrain de St-Léonard (509 m.) et la grotte de la Crête de Vaas (521 m.) se situent en Valais central (figure 1), au pied de la rive droite du Rhône,

[2] Pour le premier site, le géologue assurant le suivi estime sa durée de vie a environ 30 ans. Pour le second, les différents spéléologues qui l'utilisent régulièrement n'osent pas faire de projections au-delà de quelques années.

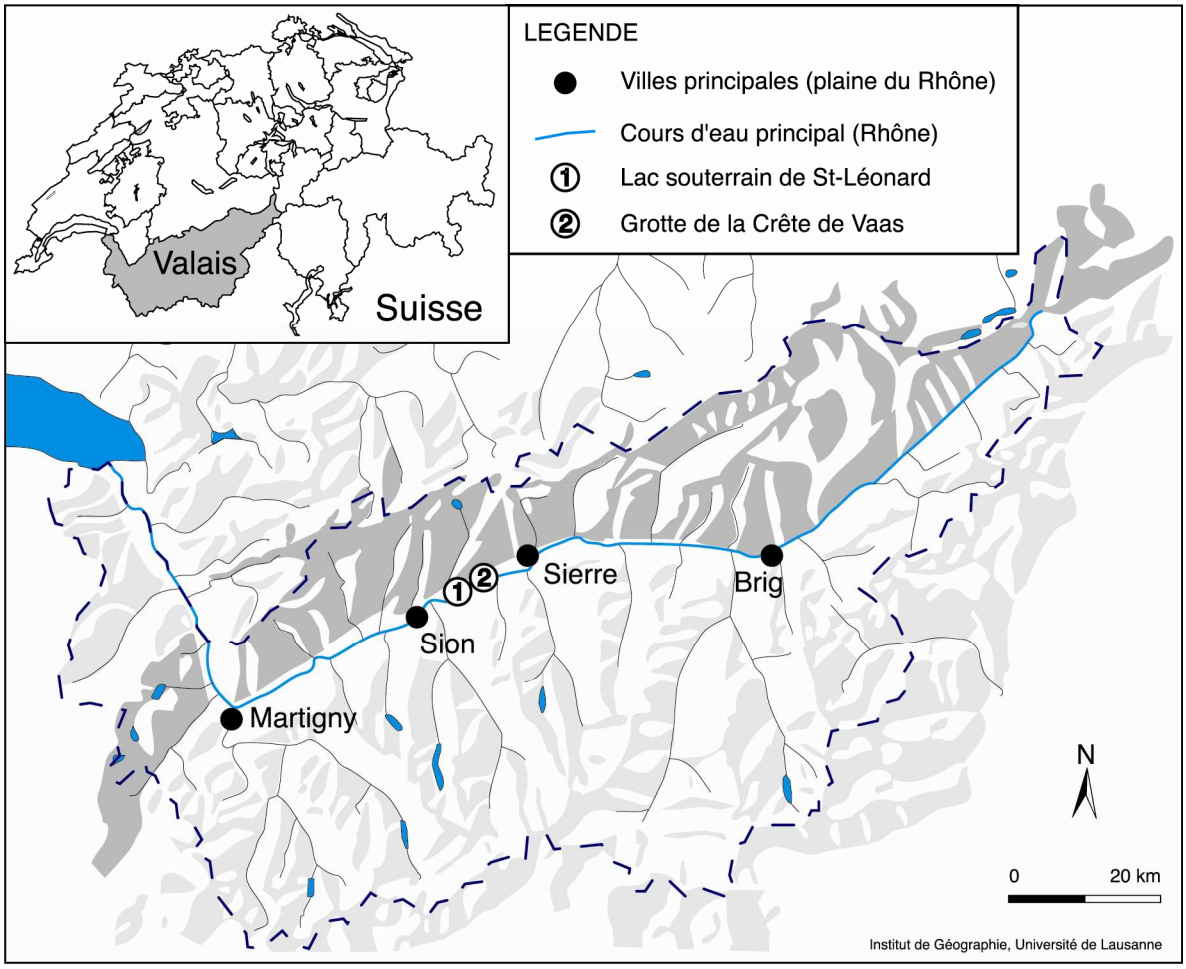


Figure 1 : Localisation des sites du lac souterrain de St-Léonard et de la grotte de la Crête de Vaas (Valais, Suisse).

Figure 2 : A gauche, entrée du lac souterrain de St-Léonard vue de l'extérieur. A droite, entrée de la grotte de la Crête de Vaas vue de l'intérieur (Clichés : J.-P. Pralong). Dans le premier cas, l'accès au site est sécurisé par des treillis de protection et des ancrages, alors que pour le second, la roche continue de s'ébouler naturellement.

entre les villages de St-Léonard et de Granges. La route cantonale qui relie les villes de Sion et de Sierre permet d'accéder presque directement à ces deux sites[3]. Pour le premier, un parking aménagé à environ 100 mètres de l'entrée du lac offre un accès facile, d'autant que le chemin qui y mène est goudronné. Quant au second, il ne fait l'objet d'aucune infrastructure d'accès spécifique et c'est uniquement par un sentier en terre, relativement raide et partant directement de la route cantonale, que l'entrée de la cavité est atteignable.

A noter qu'à quelques centaines de mètres à l'est de l'entrée du lac souterrain de St-Léonard (figure 2) se trouve une **carrière de marbre,** dont l'activité ne semble pas avoir de conséquences sur la stabilité des parois et de la voûte du lac[4]. A la même distance, à l'ouest de l'entrée de la grotte de la Crête de Vaas (figure 2), est implantée une des quatre **exploitations industrielles de gypse** au niveau suisse (Platrière SA), qui a un lien plus marqué avec la viabilité de la cavité (voir chap. 5).

2.2 Contexte géologique et géomorphologique

Comme le rappelle Nicod (1992 : 4), les karsts du gypse fournissent des modelés de karstification accélérée du fait de la **rapidité de dissolution** et de la **faible résistance mécanique** des évaporites et roches associées (marnes, argilites, cargneules). Le développement par dissolution de cavités dans le gypse varie d'un facteur 10 (Nicod 1992 : 4) à un facteur 100 (Salomon 2000 : 28) par rapport à celles se formant dans des roches carbonatées. Du point de vue de l'érosion, la gypsification[5] s'accompagne d'un gonflement de 30 à 50 % du volume de la roche provoquant des **craquelures** et des **fracturations** (Salomon 2000 : 27). La faible résistance mécanique de ce type de roches implique l'effondrement des plafonds des cavités, qui présentent généralement des développements et des volumes considérables, bien que leur dénivelé soit médiocre (Nicod 1992 : 5-6).

Cette dernière phrase s'applique très bien aux deux sites qui nous intéressent quant à leurs conditions de formation et à leur morphologie générale. Malgré tout, le **réseau karstique** de la grotte de la Crête de Vaas est **fort différent** de celui du lac souterrain de St-Léonard (Grobet 1993 : 7). D'une part, ce dernier est constitué d'une seule et vaste salle (dimension moyenne : 300 m. x 20 m.) – et non d'une succession de salles –, d'autre part, il ne présente pas les richesses minéralogiques du premier site (voir Cuchet et Tachini 2002).

Au niveau régional, ils appartiennent à la zone de Sion-Courmayeur (pennique inférieur) et plus précisément à l'unité de la Pierre-Avoi qui est constituée d'un **flysch grossier à mégablocs** ; c'est au sein d'un mégabloc de gypse triasique que ces deux cavités se sont formées (Privet 2003 : 44, Cuchet et Tachini 2002 : 15-17), suivant le réseau de fracturations et de failles existant. Concernant le lac de St-Léonard, les parois nord-ouest et sud-est appartiennent à deux autres mégablocs, respectivement constitués de schistes noirs graphiteux du Permien et de marbres massifs du Lias (Privet 2003 : 44). **Quant à la grotte de Vaas** (1'510 mètres de longueur pour 60 mètres de dénivellation selon Wildberger et Preiswerk 1997 : 188), différents auteurs

[3] D'un point de vue spéléologique, c'est entre ces deux villes que se trouve la zone de gypse la plus importante de Suisse, pays où les affleurements de ce type sont relativement rares (Wildberger et Preiswerk 1997 : 186, 188).

[4] Comm. orale de l'ancien gérant du site (P. Nanchen, 08.11.02) et du gérant actuel (J.-M. Burgi, 07.11.03).

[5] Transformation par hydratation de l'anhydrite en gypse au contact (prolongé) avec de l'eau ; l'anhydrite provient elle-même de la déshydratation du gypse lors de la diagenèse (Schoeneich et Imfeld 1997 : 40).

soulignent que **la dissolution y est bien plus marquée** que pour le site précédent, car son gypse présente une structure feuilletée qui favorise l'action de l'eau (Pittard et al. 1945 : 11, Berclaz et Perren 1975 : 3).

3. Aperçu historique de l'exploitation des sites

Bien que l'existence de ces deux cavités soit connue depuis fort longtemps des populations environnantes, ce n'est qu'au cours des années 1943-1944 que des spéléologues les explorèrent véritablement (Grobet 1993 : 2-3, Berclaz et Perren 1975 : 3). Alors que le site de Vaas est resté quasiment identique, à l'intérieur comme à l'extérieur, depuis la période de sa « découverte »[6], **celui de St-Léonard s'est fortement anthropisé** à cause du développement de son exploitation touristique.

C'est en 1949 que ce lac souterrain est rendu accessible au public (visites sur des radeaux et uniquement le week-end) et en 1952 qu'une concession est octroyée par la commune de St-Léonard à des particuliers pour son exploitation commerciale, ce qui améliora les conditions de confort et de sécurité de la visite (Grobet 1993 : 4-5). Depuis lors, ce système a perduré jusqu'à la fin de l'année 2000, période durant laquelle l'instabilité de la voûte nécessita la fermeture du site, réouvert en juin 2003 après d'importants travaux (voir chap. 4.1).

Durant la seconde partie du XXe siècle, **l'affluence ne cessa d'augmenter**, passant de 17'000 visiteurs annuels en 1963 à 120'000 en 1991; la croissance des années 70' et le « boom » des années 80' contrastent avec la baisse des années 90' qui vit retomber le nombre de visiteurs annuels à **100'000 en l'an 2000**[7]. Cette évolution correspond au schéma général de fréquentation des cavités touristiques françaises, tel que présenté par Biot (ce volume). Par rapport à leur mise en valeur, ces « attractions » seraient aujourd'hui un produit vieillissant, moins adapté aux attentes des visiteurs qu'au cours de la dernière décennie.

Concernant le site de Vaas, sa faible fréquentation, influencée par le manque de stabilité de la voûte d'entrée et par des questions de responsabilité (voir chap. 4.1), est relativement bien estimée par le Groupe de Spéléologie Rhodanien (GSR, Valais) et le Musée Suisse de Spéléologie (Chamoson, Valais). Ces deux entités y organisent – sans réelle coopération – des visites principalement d'initiation à la spéléologie et de découverte du monde souterrain.

Ainsi, **pour les années 2002 et 2003**, la fréquentation annuelle estimée est d'environ **800 à 900 personnes**, le trois quart étant dû aux visites guidées du musée en question. Ce décompte ne tient évidemment pas compte des visites (accompagnées ou non) réalisées dans un autre cadre car, au contraire du lac souterrain de St-Léonard, ce site est accessible de manière libre (absence de grille à l'entrée) et non payante. A noter que l'**absence de données historiques** fiables ne permet pas de reconstituer l'évolution de sa fréquentation, dont l'origine est difficile à dater.

[6] Comm. orale du président du Groupe de Spéléologie Rhodanien (C.-A. Lathion, 25.11.02).
[7] Comm. orale de l'ancien gérant du site (P. Nanchen, 08.11.02). A noter que l'exploitation du site se fait sur 8 mois seulement, de mars à novembre.

Bien que le niveau de fréquentation et le type d'exploitation opposent ces deux sites, leur classement à la fin des années 90' à l'inventaire (officieux et non contraignant) des géotopes d'importance nationale (ASSN 1999 : 44) les rapproche d'un point de vue géoscientifique et consacre leur rareté au niveau alpin voire européen[8]. A l'échelle du Valais, ces sites sont les seuls **géotopes spéléologiques d'importance nationale** formés dans du gypse.

4. Analyse comparée du profil des sites

Les espaces en question présentent une **opposition marquée en termes de profil**, bien que leur propriété soit publique (respectivement commune de St-Léonard et de Sierre) et que tous deux soient protégés au niveau communal (*zone protégée spéciale* pour le site de St-Léonard, *curiosité à protéger* pour celui de Vaas), ce qui ne restreint aucunement leur exploitation touristique et de loisirs actuelle (Pralong 2004 : 233).

Pour des raisons autant liées aux caractéristiques physiques des sites qu'à l'intervention de l'homme pour tenter de les « domestiquer », **le facteur premier d'explication de l'utilisation différentiée de ces sites est le risque[9]**, dont les conséquences se répercutent sur les principales composantes de leur exploitation : entretien, degré de préservation, buts de l'exploitation, marketing, niveau de fréquentation, type de tourisme et d'exploitation, rentabilité et stratégies-projets futurs. La compréhension de l'imbrication des maillons de cette chaîne constitue l'intérêt de ce chapitre.

4.1 Le facteur « risque » et sa gestion

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 2.2, le fait que ces cavités se trouvent dans des roches évaporitiques pose des problèmes bien plus importants en termes d'aléas que des espaces souterrains formés dans des roches calcaires. En ce qui concerne les cavités dénoyées, le phénomène majeur est la **multiplicité des effondrements et chutes de blocs** ; les discontinuités dans la masse gypseuse jouant un rôle essentiel (Nicod 1992 : 9).

Dans le cas du lac souterrain de St-Léonard, ce n'est véritablement qu'en 1986, suite à un éboulement conséquent de la voûte qui provoqua un raz de marée à un moment où le site était fermé à la visite, que la gestion du risque se professionnalisa. Un géologue fut alors engagé pour faire des analyses détaillées du site, définir les travaux annuels à réaliser pour permettre l'ouverture au public ; le géologue cantonal donnant l'autorisation officielle de le faire. Depuis, **d'importants travaux de génie civil** (nettoyage de la voûte et des parois) furent entrepris chaque année durant la période de fermeture hivernale[10].

[8] L'inventaire en question définit le site de St-Léonard comme « cavité située dans une mince bande de gypse, très grand lac souterrain », que l'on peut aussi considérer comme le plus grand lac souterrain d'Europe d'origine naturelle, et le site de Vaas comme « la plus grande cavité des Alpes dans le gypse, lacs vert émeraude et couches plissées de manière étonnante ».

[9] On parle de risque lorsqu'un phénomène naturel (aléa) ayant une certaine intensité et fréquence (temps de retour) peut menacer des biens et des personnes (vulnérabilité).

[10] Comm. orale de l'actuel gérant du site (J.-M. Burgi, 07.11.03).

Plus récemment, suite aux intempéries que connurent les Alpes en octobre 2000, une fissure verticale apparut dans le plafond à l'entrée du lac et un petit éboulement se produisit, **interrompant pour deux ans l'exploitation**[11]. Dans la première partie de l'année 2003, de lourds travaux de restauration (pose de 600 ancrages dans la voûte, installation de 1500 m^2 de treillis métalliques de protection et de 800 m^2 de natte d'étanchéité au fond du lac, mise en place d'un système de monitoring) furent effectués afin de prolonger sa durée de vie touristique. Cela nécessita notamment la vidange du lac, la construction d'une rampe d'accès provisoire pour les engins de chantier (Privet 2003 : 46-48), ce qui modifia fortement ses caractéristiques naturelles. En outre, de nouvelles formations rocheuses furent découvertes[12], d'autres furent détruites, sans pour autant diminuer l'intérêt de la visite.

A contrario, pour le site de Vaas, **les risques n'ont jamais été maîtrisés** par des ouvrages ou des constructions. Etant d'accès libre, il ne dépend pas d'acteurs précis et/ou coordonnés qui en assumeraient l'entière responsabilité, comme dans le cas précédemment décrit. Ainsi, le GSR n'a volontairement pas équipé le site (corde, piton, échelle, etc.), car juridiquement la responsabilité d'un « ouvrage » engage la personne morale ou physique l'ayant installé[13].

Selon la même source, les risques concernent particulièrement **l'entrée de la grotte**, zone la plus instable et dangereuse de la cavité, où est survenu il y a environ 10 ans un éboulement de plusieurs mètres cube sans dommage à des biens ou des personnes. Dans ce secteur sensible, les craintes de chutes de pierres et d'éboulement sont toujours d'actualité d'autant qu'il se situe au-dessus du passage obligé qui mène vers l'intérieur de la cavité. Dès lors, les **seules mesures (passives)** à disposition du GSR et du Musée Suisse de Spéléologie sont la visite en petits groupes, la possession d'une assurance « Responsabilité Civile » et l'information auprès de la Platrière SA quant aux jours et aux heures de minage[14].

4.2 Les conséquences du facteur « risque »

Bien que les types d'aléas soient identiques pour ces deux sites – la dissolution étant plus marquée pour celui de Vaas (Pittard et al. 1945 : 11, Berclaz et Perren 1975 : 3) –, c'est véritablement leur gestion et leur maîtrise qui diffèrent, déterminant et contrôlant **deux types d'exploitation** touristique et de loisirs (Pralong 2004 : 234-236).

Dans le cas du lac souterrain de St-Léonard, depuis deux décennies au moins, la maîtrise du risque est possible grâce à une **très bonne rentabilité du site** (le rapport nombre de visiteurs – moyens marketing investis est très bon), ceci malgré l'importance de l'investissement financier annuel en termes d'entretien (plusieurs dizaines de milliers de francs). Cette bonne santé économique se comprend dans la mesure où le site a peu de concurrence en Europe du fait de son unicité, tout en étant la plus visitée des dix grottes touristiques de Suisse[15]. Mais suite aux aléas de la fin de l'an 2000, un **changement de système**

[11] Comm. orale de l'ancien gérant du site (P. Nanchen, 08.11.02).
[12] Cf. *Le Courrier,* « Le renforcement de la voûte a débuté », 13.02.03.
[13] Comm. orale du président du Groupe de Spéléologie Rhodanien (C.-A. Lathion, 25.11.02).
[14] Comm. orale du président du Groupe de Spéléologie Rhodanien (C.-A. Lathion, 25.11.02) et du responsable du Musée Suisse de Spéléologie de Chamoson (J.-F. Crittin, 10.02.04). Jusqu'à présent, le rôle du minage sur l'instabilité de la voûte et des parois reste à prouver (Bureau d'études Impact SA et Bruttin géologue conseil 2004, annexe 2, art. 10 du règlement du PAD).
[15] Comm. orale de l'ancien gérant du site (P. Nanchen, 08.11.02).

d'exploitation a dû s'opérer pour permettre le financement et la réalisation des travaux indispensables de restauration devisés à 2,5 millions de francs[16].

Ainsi, le système de concession communale, octroyée à un particulier et donnant lieu au paiement de redevances, laissa sa place après un demi-siècle de bon fonctionnement à une société anonyme (S.A. du Lac souterrain), dont la commune de St-Léonard est l'unique actionnaire. L'exploitation du site fut dès lors confiée à un gérant d'expérience en matière touristique. Face à la variation journalière et saisonnière de la fréquentation, la flexibilité et la disponibilité des employés locaux continuent, comme sous le système précédent (à caractère familial), de permettre une exploitation optimale de ce « spot »[17].

Cette situation nouvelle et plus professionnelle, induite par la stabilité artificielle de la voûte et l'importance économique du site pour la commune et l'économie locale, orienta nécessairement les buts de l'exploitation vers un **pôle économique** (encore) **plus marqué** (remboursement des emprunts par l'augmentation du prix des billets d'entrée), tout en permettant des projets plus ambitieux que précédemment (augmentation de l'affluence et du budget d'exploitation, réaménagement du site et sa boutique)[18].

Concernant le site de Vaas, le frein que constitue l'absence de maîtrise des aléas ne permet pas d'en faire un véritable espace touristique – et ceci même si l'envie de le faire existait – tant au niveau du marketing que de l'exploitation. Pour autant, il n'est **pas dénué d'intérêt économique** ; les excursions que réalise chaque année le Musée Suisse de Spéléologie représentent une manne financière importante par rapport à l'ensemble des visites spéléologiques proposées, sachant qu'une sortie d'une demi-journée correspond à 60 entrées au musée[19]. Facile à parcourir pour tous les publics, accessible toute l'année et par tous temps, ce site est **idéal pour l'initiation à la spéléologie**. Le GSR s'en sert d'ailleurs dans le but d'attirer de nouveaux membres et pour la formation de ses spéléologues[20], utilisant ainsi les intérêts scéniques et scientifiques du site.

Des travaux tels que ceux entrepris à St-Léonard seraient théoriquement envisageables. Cependant, l'accès à la cavité étant peu commode, les investissements nécessaires pour attirer un nombre important de visiteurs seraient trop élevés. De plus, l'impact sur ce **site à haute valeur géoscientifique** (voir chap. 5) serait considérable. Dans ce sens, les projets actuels liés à cet espace concernent uniquement la préservation du site et de son accès, notamment par rapport à l'activité d'extraction de la Platrière SA (voir ci-dessous), ainsi que la réalisation d'une topographie virtuelle visant à conserver une mémoire du site au cas où son entrée venait à s'obstruer[21].

D'un point de vue didactique, il faut noter qu'une valorisation existe pour ces deux cas, malgré les problèmes de sécurité et les différences d'affluence. Les visites d'initiation guidées par le GSR pour le site de Vaas et celles commentées par les guides-rameurs du lac souterrain de St-Léonard ont un intérêt éducatif certain, d'autant qu'elles ne créent **aucun impact négatif direct en lien avec la fréquentation** ainsi canalisée. En outre, le site de St-

[16] Cf. *Le Nouvelliste*, « Caverne liftée », 16.01.03.
[17] Comm. orale de l'actuel gérant du site (J.-M. Burgi, 07.11.03).
[18] Comm. orale de l'actuel gérant du site (J.-M. Burgi, 07.11.03).
[19] Comm. orale du responsable du Musée Suisse de Spéléologie de Chamoson (J.-F. Crittin, 10.02.04).
[20] Comm. orale du président du Groupe de Spéléologie Rhodanien (C.-A. Lathion, 25.11.02).
[21] Comm. orale du président du Groupe de Spéléologie Rhodanien (C.-A. Lathion, 25.11.02) et du responsable du Musée Suisse de Spéléologie de Chamoson (J.-F. Crittin, 10.02.04).

Léonard propose une petite brochure grand public et des informations sur le site web de l'Association suisse des exploitants de cavernes aménagées pour le tourisme[22] (ASECAT).

5. Stratégie de gestion durable intégrée

Fort de ce constat, l'utilisation touristique de ces deux cavités karstiques nécessite une vision à une échelle régionale. Un modèle de **gestion durable intégrée,** allant dans le sens d'un développement durable efficient, est donc proposé. Pour ce faire, une évaluation des modifications anthropiques et du potentiel touristique de ces espaces est nécessaire. Comme le relève Salomon (2000 : 226), « *d'une façon générale, les sites karstiques sont de plus en plus reconnus pour leur valeur patrimoniale et paysagère, ce qui nécessite une évaluation de leur intérêt et de leur vulnérabilité* ».

Concernant le lac souterrain de St-Léonard, la première modification majeure fut la **régulation artificielle du niveau du plan d'eau**, que le fort tremblement de terre de 1946 avait déjà modifié (Grobet 1993 : 9-10). Dans les années 50', il fallut ainsi pomper de l'eau pour que le lac soit accessible au public et vers le milieu des années 60', son niveau de base fut définitivement régulé par un trop-plein foré dans la roche[23]. Lors des travaux de restauration menés en 2003 (voir chap. 4.1), une natte d'étanchéité a été posée dans la partie occidentale du lac et chaque été, il est nécessaire de rajouter de l'eau pour le lac soit navigable durant la période d'exploitation touristique[24].

Pour le site de Vaas, la première (et unique) modification fut en 1970-1971 la désobstruction d'accès à l'intérieur du réseau, ce qui permis d'atteindre les boyaux terminaux (Berclaz et Perren 1975 : 3). Sinon, récemment, un conflit est survenu par rapport au **projet d'extension de la zone d'extraction** de la Platrière SA. Pouvant menacer l'entrée de la cavité voire la condamner, il opposa cette entreprise au WWF, à Pro Natura, à la Société Suisse de Spéléologie et au GSR (Bureau d'études Impact SA et Bruttin géologue conseil 2004 : 1).

Le litige, initié par une opposition concernant la **protection des intérêts biologiques** de l'entrée du site, fut réglé par la signature d'une convention en 2004, qui préserve le site et son accès sans pour autant bloquer l'exploitation industrielle future du gypse. Le règlement du plan d'aménagement détaillé (PAD) nécessaire à la réalisation du projet d'extension stipule qu'à l'avenir « *l'extraction de matériaux se fera de manière à assurer l'intégrité de la grotte* » (art. 14) et qu'un « *périmètre de sécurité doit impérativement être respecté tout autour et en dessus de la Grotte de Vaas pour le cas où […] une autorisation de construire et d'exploiter était demandée […]* » (art. 10) (Bureau d'études Impact SA et Bruttin géologue conseil 2004 : annexe 2).

Du point de vue des modifications anthropiques et en considérant les éléments mentionnés au chapitre précédent, **l'intérêt (géo)scientifique** – notamment au niveau de l'intégrité – est supérieur en ce qui concerne le site de Vaas, alors que l' **« employabilité » économique** et touristique – notamment au niveau du

[22] www.grotte.ch. Le but de cette association est de promouvoir le tourisme dans les grottes aménagées de Suisse, ainsi que la protection du patrimoine souterrain contre la destruction sauvage et la pollution.
[23] Comm. orale de l'ancien gérant du site (P. Nanchen, 08.11.02).
[24] Comm. orale de l'actuel gérant du site (J.-M. Burgi, 07.11.03).

risque et de la renommée – penche en faveur du site de St-Léonard. Cette constatation est confortée par le potentiel scientifique et économique de ces sites (tableau 1), dont l'évaluation semi-quantitative découle d'une méthode que l'auteur a développée et déjà présentée en détails (2005). Relevons que cette évaluation n'a pas pour but de cerner les impacts des activités touristiques sur une cavité particulière, mais plutôt de définir la valeur touristique de celle-ci, afin de pouvoir, par la suite, comparer ses valeurs avec son utilisation concrète.

Cette méthode fonctionne grosso modo de la manière suivante. Plusieurs critères sont attribués à chaque valeur. Par exemple, la valeur scientifique est calculée sur la base de notes attribuées à 5 critères, à savoir l'intérêt paléogéographique, la représentativité, la rareté naturelle, l'intégrité et l'intérêt écologique. La valeur économique, elle, est calculée sur la base de notes attribués aux 6 critères suivants : l'accessibilité, la présence et la gestion des risques naturels, le nombre de visiteurs annuels de la région, le niveau de protection et l'attractivité du site. Ces notes sont ensuite agrégées et le résultat du calcul donne un score final pour chaque valeur.

Valeurs de potentiel des sites	***Lac souterrain de St-Léonard***	***Grotte de la Crête de Vaas***
Valeur scénique	0.5	0.65
Valeur scientifique	0.55	**0.85**
Valeur culturelle	0.3	0.08
Valeur économique	**0.8**	0.45

Tableau 1 : Evaluation des valeurs qui définissent un site géomorphologique selon Panizza et Piacente (1993 : 14). Ces scores permettent de quantifier l'intérêt potentiel d'un site qui peut varier entre 0 (score nul) et 1 (score maximum). Par exemple, la valeur scientifique du lac souterrain de St-Léonard (0.55) est nettement plus faible que celle de la grotte de la Crête de Vaas (0.85).

Dès lors, à l'échelle du Valais, une **utilisation** touristique et de loisirs des cavités karstiques formées dans du gypse doit se faire de manière **intégrée** entre les deux sites en question, c'est-à-dire en tenant compte des fonctions qu'ils peuvent remplir **selon leur intégrité et leur potentiel respectifs**. A l'avenir, la préservation du site de Vaas peut contenter les spéléologues de tous niveaux comme les scientifiques, et l'utilisation économique de celui de St-Léonard garantir des retombées financières directes et indirectes à la population locale, en attirant les amateurs autochtones ou non (excursionnistes, touristes) de cavités souterraines.

Consciemment ou non, les exploitants et utilisateurs principaux de ces sites mettent déjà en oeuvre une « politique » de ce type, sans que les communes propriétaires ne participent de manière coordonnée à ce processus. Dans ce contexte, une gestion durable doit passer par une **prise de conscience des valeurs de ces sites de la part des différents acteurs impliqués** (carrière et platrière incluses), afin de garantir la pérennité de leur utilisation actuelle et d'éviter une diminution de leur valeur scientifique et économique respective ; une utilisation n'étant plus en adéquation avec leur potentiel doit donc être évitée.

A ce niveau, le ***statuo quo*** actuel est donc requis. Ce dernier est **satisfaisant**, si l'on considère chaque site non pas de manière séparée, mais comme faisant partie d'un ensemble complémentaire. Ce binôme concilie en fait la totalité des

acteurs concernés, sans négliger aucun des pôles du développement durable (écologie, économie et société). En résumé, il serait autant absurde d'aménager le site de Vaas pour y développer un type de tourisme moins doux qu'à l'heure actuelle, que de ne pas « maximiser » l'utilisation touristique de celui de St-Léonard, situé tout proche, parfaitement aménagé et de réputation internationale.

6. Conclusions et perspectives

La **karstification accélérée des roches évaporitiques**, à l'origine de la formation du lac souterrain de St-Léonard et de la grotte de la Crête de Vaas, est dans le même temps initiatrice des aléas (éboulements, chutes de pierres) menaçant l'existence de leur activité touristique et de loisirs. Comme nous l'avons montré, l'utilisation de ces géotopes est régulée par le facteur « risque » qui oriente leur entretien et leur gestion, leur degré de préservation, les buts de l'exploitation, le niveau de fréquentation, le type de tourisme, la rentabilité et les projets futurs.

Bien que ces sites soient à des stades d'évolution touristique différents, une **vision intégrée et commune à l'échelle régionale de leur utilisation touristique** est nécessaire dans une perspective de développement durable efficient. Basée sur l'évaluation des modifications anthropiques et des intérêts scéniques, scientifiques, culturels et économiques, cette approche – qui peut aussi s'appliquer à un massif glaciaire comme à un environnement côtier – permet d'une part, d'attribuer les meilleures fonctionnalités à des sites (complémentaires) en adéquation avec leurs potentiels et d'autre part, d'éviter une diminution de leurs valeurs.

De manière plus large, une **gestion durable intégrée** de ressources naturelles d'importance devrait tendre à mettre en application le principe de *protection dynamique* que défend Coratza (2004), c'est-à-dire en suivant une approche garantissant leur préservation tout en mettant en valeur leurs caractéristiques scientifiques et culturelles pour répondre aux besoins de la société moderne.

Bibliographie

ASSN (1999). Inventaire des géotopes d'importance nationale, *Geol. Insubrica, 4*, 25-46.

Berclaz M.-A., Perren G. (1975). La grotte de la Crête de Vaas, revue et corrigée (Sierre, Valais), *Stalactite*, *2*, 3-5.

Biot V. (2005). La gestion durable de l'environnement karstique à travers l'activité touristique : le cas des grottes touristiques en France in : *Gestion durable de l'environnement karstique, La Chaux-de-Fonds, 3-4 septembre 2004*, Institut universitaire Kurt Bösch, ce volume.

Bureau d'études Impact SA et Bruttin géologue conseil (2004). *Demande d'autorisation de construire l'étape 2 de la carrière de la Platrière, notice d'impact sur l'environnement*, 25 p.

Coratza P. (2004). Géomorphologie et culture. Exemples de valorisation en Emilie Romagne (Italie), in : Reynard E., Pralong J.-P. (Eds.). *Paysages géomorphologiques*, Compte-rendu du séminaire de 3ème

cycle CUSO 2003, Lausanne, Institut de Géographie, *Travaux et Recherches n°27* , 209-223.

Cuchet S., Tachini P. (2002). Nouvelle association minérale à arséniates de cuivre. Granges, Valais (Suisse), *Le Règne Minéral, 44*, 15-21.

D'Andrea M., Mattig U., Pereira J. (2004). Show caves : the main tourist attraction in geology. Problems and perspectives, *32nd International Geological Congress, Firenze, Abstracts volume*, 429.

Grobet A.-H. (1993). *Le lac souterrain de Saint-Léonard (Valais-Suisse),* 12 p.

Nicod J. (1992). Recherches nouvelles sur les karsts des gypses et des évaporites associées (première partie : processus et cavernement), *Karstologia*, *20*, 1-10.

Nicod J. (1993). Recherches nouvelles sur les karsts des gypses et des évaporites associées (seconde partie : géomorphologie, hydrologie et impact anthropique), *Karstologia*, *21*, 15-31.

Panizza M., Piacente S. (1993). Geomorphological assets evaluation. *Zeitschr. für Geomorphologie N.F.*, *Suppl. Bd., 87*, 13-18.

Pittard J.-J., Amoudruz G., Della Santa J. (1945). La grotte de la Crête de Vaas (Valais), *Bulletin de la Société Suisse de Spéléologie*, 2-12.

Pralong J.-P. (2004). Le géotourisme dans les régions de Crans-Montana-Sierre (Valais, CH) et de Chamonix-Mont-Blanc (Haute-Savoie, F), In : Reynard E., Pralong J.-P. (Eds.). *Paysages géomorphologiques*, Compte-rendu du séminaire de 3ème cycle CUSO 2003, Lausanne, Institut de Géographie, *Travaux et Recherches n°27* , 225-241.

Pralong J.-P. (2005). A method for assessing tourist potential and use of geomorphological sites, *Géomorphologie, 3*, 189-196.

Privet M. (2003). Le lac souterrain de St-Léonard / VS. Travaux de consolidation de la grotte, *Chantiers et Rénovation*, *6-7*, 42-48.

Reynard E. (2003). Protection et mise en valeur touristique d'un site géomorphologique : la région du Sanetsch (Valais, Suisse), in : Reynard E., Holzmann C., Guex, D. Summermatter N. (Eds.), *Géomorphologie et tourisme*, Lausanne, Institut de Géographie, *Travaux et Recherches n°24* , 35-51.

Salomon J.-N. (2000). *Précis de karstologie*, Pessac, Presse Universitaires de Bordeaux, 245 p.

Schoeneich P., Imfeld P. (1997). Les karsts du gypse de la zone des cols (Préalpes vaudoises), *Bulletin de la Société Neuchâteloise de Géographie*, *41*, 39-45.

Wildberger A., Preiswerk C. (1997). Karst et grottes de Suisse, Basel, Speleo Projects, Caving Publications International, 208 p.

Valorisation géotouristique du karst de Tsanfleuron (Valais, Suisse)

Emmanuel REYNARD
Institut de Géographie, Université de Lausanne
Quartier Dorigny, Bâtiment Humense
CH – 1015 Lausanne
emmanuel.reynard@unil.ch

Résumé

Le géotourisme constitue une forme d'écotourisme mettant au centre de ses activités la valorisation du patrimoine géologique et géomorphogique d'une région. Le glacio-karst de Tsanfleuron, dans la région du Sanetsch (Valais), a une valeur géomorphologique de première importance et offre un potentiel géotouristique intéressant. Après avoir rappelé les éléments de la valeur géomorphologique du karst, cet article résume les étapes du développement touristique dans la région et ses impacts sur les formes du relief. Le développement du géotourisme dans le secteur passe par deux séries de mesures : d'une part, la mise sous protection des secteurs sensibles de la région (notamment la marge proglaciaire) et l'édiction de restrictions d'usage ; d'autre part, la réalisation de cinq produits géotouristiques intégrés (une brochure didactique, une carte géotouristique multilingue, des panneaux didactiques sur le karst et le retrait glaciaire à l'hôtel du Sanetsch et à la cabane de Prarochet, et finalement un dépliant et concept audio sur l'histoire glaciaire de la vallée, disponible sur la ligne postale menant au Sanetsch).

Abstract

Geotourism is a form of ecotourism that emphasizes the promotion of the geological and geomorphological heritage of an area. The Tsanfleuron glacio-karst, in the Sanetsch region (Valais), is of high geomorphological importance and represents an interesting geotourist potential. This paper develops the principal elements that constitute the area's geomorphological value and presents the main steps of tourist development in the area, and its impacts on landscape and landforms. The development of geotourism should be made by two series of measures: on the one hand, the protection of some specific sensible sectors (principally the glacier forefield); on the other hand, the development of five integrated geotourist products (a didactic booklet, a multilingual geotourist map, didactic boards on karst geomorphology and glacial variations at the Sanetsch Hotel and Prarochet Hut, and finally, an audio-concept and leaflet on the valley's glacial history, in the postal buses reaching the area).

1. De la valeur géomorphologique au géotourisme

Le tourisme alpin, après trente ans dévolus au ski et aux autres sports d'hiver, réintègre petit à petit la saison d'été qui avait fait ses belles heures à la fin du XVIIIe et au XIXe siècle. Cette tendance est marquée par un nouvel intérêt pour des formes de tourisme plus doux, plus proche de la nature et des populations locales, avec leurs traditions, leurs coutumes, leurs produits locaux, etc. Ces nouvelles pratiques peuvent être regroupées sous le terme d'écotourisme, une forme de tourisme qui met au centre de l'activité touristique la découverte de la nature d'une région et de ses relations avec la société locale.

Le géotourisme est une forme d'écotourisme basée principalement sur la découverte du patrimoine abiotique d'une région. L'offre primaire du géotourisme est ainsi constituée par la présence de fossiles, de minéraux, de formes particulières, de phénomènes géologiques, de mines, en activités ou anciennes, etc. Autour de cette offre primaire se constituent des produits et des services géotouristiques (offre secondaire) visant à promouvoir la richesse du patrimoine géologique et géomorphologique de la région. L'offre secondaire est constituée par exemple de panneaux didactiques, de randonnées guidées, de musées thématiques ou encore de brochures de vulgarisation scientifique.

Ces produits et services sont créés sur la base d'une évaluation de la valeur du site ou de la région pour les sciences de la Terre. Dans cet article, nous nous concentrons uniquement sur la valeur géomorphologique. Cette dernière est couramment divisée en cinq sous-valeurs : scientifique, écologique, culturelle, esthétique et économique (Panizza et Piacente 1993, Reynard 2004a), la valeur scientifique étant centrale, les quatre autres constituant des valeurs additionnelles (Reynard 2004b). Les produits et services géotouristiques visent à promouvoir cette valeur auprès de la clientèle touristique. Ils peuvent être basés essentiellement sur la valeur centrale (ex. panneaux didactiques présentant la formation d'un paysage, exposition de minéraux, excursion guidée à la recherche de fossiles, etc.) ou au contraire inclure les valeurs additionnelles (ex. visites de mines proposant une présentation géologique et l'histoire minière de la région, présentation des roches ayant servi à la construction des monuments historiques d'une ville, visite spéléologique alliant l'effort physique et des explications sur le karst souterrain, etc.).

Cet article concerne le glacio-karst de Tsanfleuron, dans la région du Sanetsch, dans les Alpes Bernoises (figure 1) et les différentes formes de valorisation géotouristique qui l'ont concerné au cours des dix dernières années. Nous rappelons tout d'abord brièvement quelle est la valeur géomorphologique du site, puis nous passons en revue les principales réalisations géotouristiques de ces dix dernières années, avant de nous interroger sur les perspectives pour un développement géotouristique dans la région.

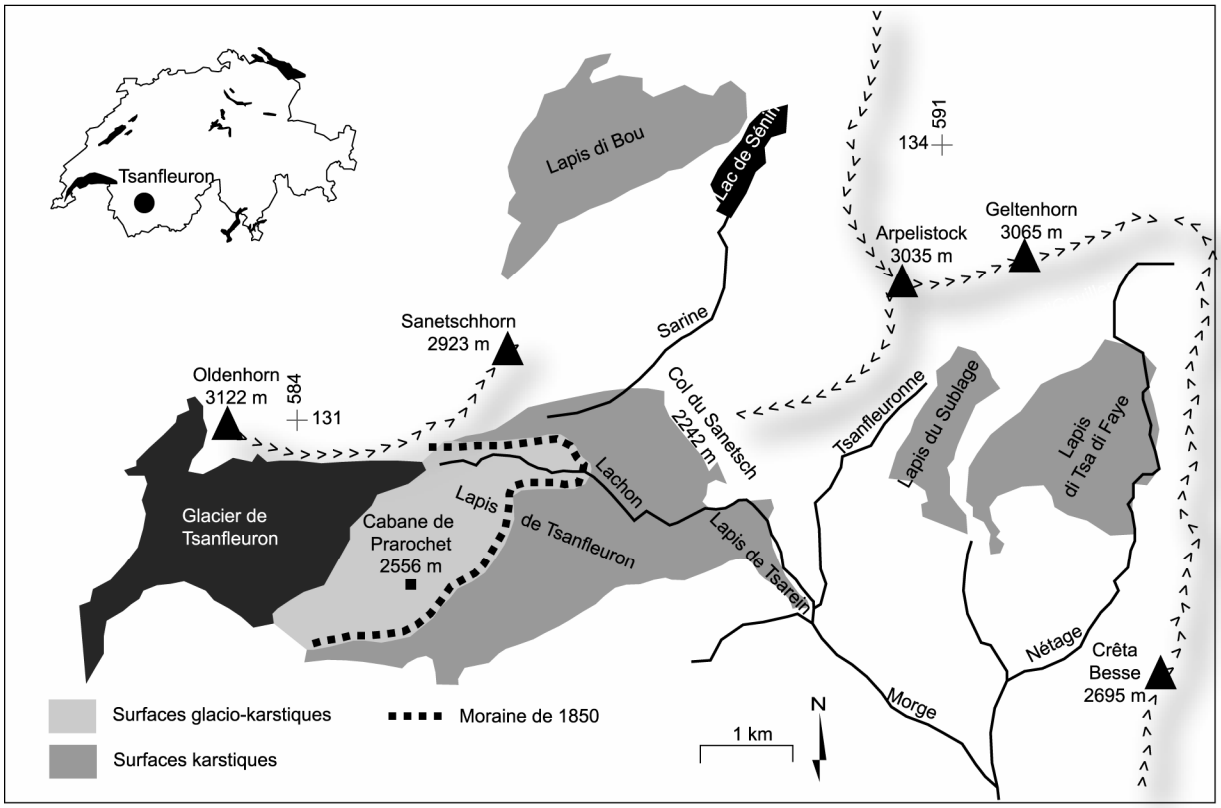


Figure 1 : Situation géographique du karst de Tsanfleuron (Lapis signifie Lapiés en patois local) ; les autres surfaces karstiques sont également représentées

2. La valeur géomorphologique du karst de Tsanfleuron

Le karst de Tsanfleuron qui s'étend sur un vaste plateau de 9 km^2 incliné vers l'est constitue l'une des grandes étendues karstiques de montagne des Alpes suisses (figure 2). Le lapiaz entaille de l'est vers l'ouest des calcaires d'âge tertiaire, puis crétacé (calcaires massifs à faciès urgonien) (Kunz 1982) déblayés par l'érosion glaciaire. La particularité géomorphologique principale est sa subdivision en deux grandes unités séparées par les moraines du Petit Age Glaciaire. A l'aval, le lapiaz a été déglacé depuis le début de l'Holocène (Maire 1976). A l'amont, la déglaciation est beaucoup plus récente et ne date que de quelques dizaines d'années et au maximum 150 ans. Il en résulte un relief dont la morphologie est dominée par les formes glaciaires (roches moutonnées, roches striées, chenaux de Nye, Sharp et al. 1989), mais qui recèle également des formes karstiques importantes (lapiés en banquettes structurales, Maire (1977, 1990 : 677), dolines), constituant en fait un très bel exemple de glacio-karst (figure 3) récemment déglacé, ce que R. Maire (1977)

appelle un karst en roches moutonnées. La surface karstique ayant également été déglacée durant l'Atlantique, on observe la présence de lapiés holocènes rabotés par la suite par le glacier et enduits d'encroûtements carbonatés lors de la réavancée du Petit Age Glaciaire (Lemmens et al. 1982, Souchez et Lemmens 1985, Maire 1990 : 677). R. Maire (1990) et A. Lambotte (1995) se sont penchés sur les paléokarsts tertiaires et notamment sur les remplissages de dolines par des dépôts terrigènes du Sidérolithique (figure 4).

En raison de la diversité des formes, de la grandeur de l'exokarst et du développement des réseaux souterrains, le site a été étudié depuis les années 1950 par nombre de karstologues et spéléologues (Corbel 1957, Maire 1976, 1990). En 1977, Berclaz publie un premier inventaire spéléologique de la région et encore à l'heure actuelle, le karst fait l'objet d'explorations spéléologiques. Dans les années 1980-90, plusieurs recherches appliquées ont porté sur les écoulements souterrains (Masotti 1997).

Le karst de Tsanfleuron a également suscité l'intérêt des glaciologues. Le glacier du Petit Age Glaciaire a laissé une ceinture de moraines bien visible dans le paysage. Entre le dernier maximum du Petit Age Glaciaire (1850) et 1973, date du dernier inventaire des glaciers suisses, le glacier de Tsanfleuron a perdu 47% de sa surface, passant de 7.19 à 3.82 km^2 (Abegg et al. 1994, Wipf 1999), une perte qui fait de cet appareil un glacier très sensible aux variations climatiques. Les modélisations de Abegg et al. (1994) prévoient encore une perte de 51% de la surface de 1973 d'ici 2015 à 2025. Ce retrait rapide a permis la mise à nu du plancher calcaire et des formes glacio-karstiques évoquées ci-dessus. Il a également donné naissance à un sandur très actif, dont les chenaux tressés sont modelés par les variations brusques de débit du cours d'eau proglaciaire du Lachon. En raison de sa dynamique rapide et de sa situation sur un plancher calcaire, le glacier de Tsanfleuron a également fait l'objet de multiples recherches sur la composition et les mécanismes de formation, par regel, de la glace basale, ainsi que ses effets sur l'érosion sous-glaciaire (Hallet et al. 1978, Maire 1978, Lemmens et al. 1982, Hubbard et Hubbard 1998, Hubbard 2002, Hubbard et al. 2000, 2003).

La géomorphologie a été étudiée par Reynard (1992, 1997a). En 1997 a notamment été publiée une carte géomorphologique du site.

Figure 2 Vue du karst de Tsanfleuron (cliché : E. Reynard, août 2001).

Figure 3 : Vue du karst en roches moutonnées à l'amont de la ceinture de moraines du Petit Age Glaciaire (cliché : E. Reynard, août 2003).

Figure 4 : Doline colmatée par des dépôts terrigènes du Sidérolithique. En dehors des dépressions, ces dépôts ont été érodés par le glacier. La présence de ce colmatage au fond des dolines témoigne de l'ancienneté (remplissage d'âge éocène) de certaines formes karstiques (cliché : E. Reynard, août 2003).

3. Dix ans de valorisation géotouristique sur le karst de Tsanfleuron

3.1 Le tourisme à Tsanfleuron

L'utilisation touristique du karst de Tsanfleuron et les problèmes que le tourisme pose dans la région ont déjà fait l'objet d'un article publié en 1997 (Reynard 1997b). J'y reviens rapidement.

Si l'on fait abstraction des voyageurs naturalistes qui ont arpenté la région au XVIII-XIXe siècle – notamment Scheuchzer et Studer –, il faut attendre l'ouverture de l'hôtel du Sanetsch en 1887, situé près de l'alpage de Tsanfleuron, sur la bordure du karst, pour que le tourisme débute véritablement dans la région. L'hôtel vit son heure de gloire avant la Première guerre mondiale, période durant laquelle il accueille des touristes pour de longs séjours dans un lieu aux nombreuses richesses botaniques. Après le second conflit mondial, la station des Diablerets développe un téléphérique (1964), d'abord créé pour l'observation du paysage en été, puis devenu tête de pont pour le ski d'été dès 1971 et le ski hivernal dès 1988. En 2005, les installations, à peine rénovées quelques années plus tôt, ont fait faillite et une nouvelle société exploite actuellement le domaine skiable. Le début des années 1990 voit la construction d'une cabane de montagne sur le karst, donnant lieu au développement de la randonnée pédestre, assez confidentielle sur les grandes étendues karstiques de Tsanfleuron jusque-là. Autant le tourisme de ski que la réalisation d'infrastructures pour la randonnée pédestre sur le karst ont occasionné des impacts sur la morphologie karstique, principalement par la construction de voies d'accès, notamment une route illégale construite en démantelant la moraine du Petit Age Glaciaire (Reynard 1997b, Reynard et al. 2003). Actuellement, l'homologation du plan d'affectation des zones de la commune de Savièse dans la région de Tsanfleuron fait l'objet d'un recours du WWF, recours basé sur les conclusions de mon article (Reynard 1997b).

La construction de la Cabane de Prarochet (1993) a attiré un nombreux public, locaux et touristes, sur le karst de Tsanfleuron. C'est ce qui a poussé un groupe de géographes des universités de Bruxelles et Lausanne à rédiger une brochure didactique sur la géomorphologie karstique (Collectif 1995). D'autres prestations géotouristiques ont suivi. Elles font l'objet d'une brève présentation dans les lignes qui suivent.

3.2 Réalisations géotouristiques

Une **brochure didactique** de 64 pages en quadrichromie et format A6 a été publiée à 1000 exemplaires par la Commission culturelle de la Commune de Savièse en 1995 (Collectif 1995). Initiée sous l'impulsion du ski-club Savièse, propriétaire de la cabane de Prarochet, elle a été rédigée principalement par des géomorphologues, sur la base de deux travaux de diplôme réalisés sur le karst de Tsanfleuron (Reynard 1992, Lambotte 1995). La brochure contient

également quelques pages relatives à la flore, à la faune et à la spéléologie, rédigées par des spécialistes. Un chapitre concerne la cabane de Prarochet et le système de toilettes sèches adopté afin de protéger les eaux souterraines contre une éventuelle pollution. Les thématiques décrites sont organisées en 10 postes d'observation le long d'un parcours rejoignant le col (2250 m) à la Tour St-Martin (2908 m). Cet itinéraire a été balisé à la peinture directement sur la roche en 1996. Des balises devaient être posées sur les sites d'observation. Cela n'a finalement pas été fait, le maître d'oeuvre et les auteurs ayant délaissé le projet, une fois la brochure publiée. Cette dernière étant épuisée depuis 2002, une nouvelle version a été publiée en 2004 (Reynard 2004c), sous le titre *« Tsanfleuron, entre roche et glace. Une invitation à la découverte géomorphologique du karst de Tsanfleuron »*. Cette nouvelle version, publiée à 3000 exemplaires par la Commission des relations publiques et tourisme de la commune de Savièse, reprend le même format que la précédente édition. Elle se concentre essentiellement sur la géologie, la géomorphologie et la glaciologie, ce qui en fait un produit orienté fortement vers le géotourisme. Certaines pages sont reprises de la première édition, mais une partie nouvelle développe de manière substantielle les variations glaciaires et le retrait du glacier de Tsanfleuron (figure 5). La brochure n'est par ailleurs plus liée, comme dans la première édition, à un parcours spécifique sur le karst. Cette brochure fait actuellement l'objet d'une procédure d'évaluation dans le cadre d'un mémoire de licence réalisé à l'Université de Lausanne (Berrebi, en cours).

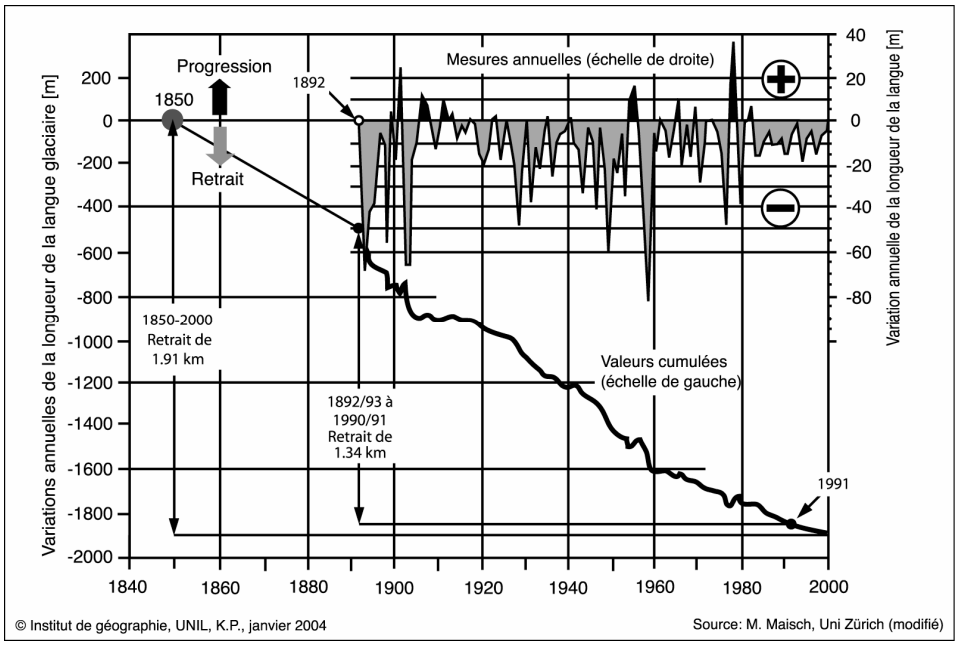


Figure 5 : Le retrait récent du glacier de Tsanfleuron.

Cet itinéraire didactique a été inclus et a fait l'objet d'une adaptation dans l'ouvrage *« Géotopes. Un voyage dans le temps »* publié par D. Decrouez et al. (2002). Le chapitre « Le sentier naturaliste de Tsanfleuron VS : au pays des diables » présente sur six pages l'itinéraire didactique et une brève présentation géologique.

La société de développement a publié à la fin des années 1990 un **dépliant touristique** proposant des randonnées pédestres dans la région. Rédigé en deux langues (français, allemand), il présente brièvement certaines particularités naturelles – notamment géomorphologiques – et culturelles de la région.

Les **visites guidées** ne sont pas organisées de manière systématique. Elles sont menées par des accompagnateurs en moyenne montagne, le géologue Thierry Basset ou encore l'auteur de ce texte. Selon les intervenants, elles se focalisent plus ou moins sur la géomorphologie karstique. Le Musée suisse de spéléologie de Chamoson organise également des visites spéléologiques à Tsanfleuron ; ces explorations ont un caractère essentiellement sportif.

4. Perspectives pour le géotourisme

Le karst de Tsanfleuron constitue un géotope d'importance nationale (ASSN 1999, Lugon et Reynard 2003). Il s'agit du plus grand glacio-karst du pays. La présence d'un glacier en retrait rapide favorise le développement de formes variées qui ont attiré des chercheurs de plusieurs universités étrangères. En ce sens, le karst de Tsanfleuron constitue un laboratoire à ciel ouvert et un témoin de l'histoire géologique et climatique des Alpes.

Dans le cadre d'une évaluation du potentiel géotouristique de divers sites des Hautes Alpes calcaires (Pralong et al. 2005), basée sur une méthode numérique mise au point par J.-P. Pralong (2005), le lapiaz glacio-karstique de Tsanfleuron obtient une valeur scientifique et esthétique élevée (respectivement 0.85 et 0.9 sur 1). Sa valeur économique et culturelle est par contre plus faible (respectivement 0.6 et 0.3). Le potentiel géotouristique, basé sur la valeur scientifique et esthétique est donc important et la région mérite une valorisation touristique au cours des prochaines années, ceci d'autant plus que de nouvelles infrastructures touristiques ont vu récemment le jour dans la région (rénovation de l'Hôtel du Sanetsch et du Yeti Palace, une buvette située au pied de la Tour St-Martin, toutes deux achevées en 2005).

Un tel développement géotouristique passe à notre avis par deux voies. Il faut d'une part maintenir la qualité du site, soit par la mise sous protection des secteurs sensibles soit par la mise en oeuvre d'un plan d'aménagement coordonné. Il s'agit également de développer une offre coordonnée de produits géotouristiques pour des publics divers.

En termes de **protection**, le géotope de Tsanfleuron ne bénéficie pour l'instant d'aucune protection légale (Reynard et al. 2003) : l'inscription à l'inventaire des géotopes d'importance nationale n'a aucune valeur légale ; le sandur et la marge proglaciaire avaient été proposés pour une mise à l'inventaire des marges glaciaires d'importance nationale, mais le site n'a finalement pas été retenu après la consultation des cantons et communes ; et finalement, le projet de Parc national des Muverans, dans lequel le karst aurait été intégré, a récemment été enterré. L'étude des impacts des activités touristiques a toutefois montré que celles-ci ont parfois des effets négatifs sur la dynamique morphologique et sur le paysage karstique (Reynard 1997a, Reynard et al. 2003). Les principales atteintes sont la destruction partielle de la moraine

historique, la réalisation d'infrastructures de transport sur le karst et le cheminement en véhicules tout-terrain sur le lapiaz. Pour cette raison, la Commune de Savièse a mandaté une étude faisant l'état des lieux des activités touristiques et de leurs impacts sur l'environnement dans toute la région du Sanetsch (incluant le karst de Tsanfleuron). Sur la base de ce rapport, un plan de gestion a été élaboré (Commune de Savièse 2000). Il prévoit notamment une limitation de l'accès motorisé sur le lapiaz et l'inscription du site en tant que géotope d'importance régionale ou locale. Ce plan n'a toutefois aucune force légale contraignante et pour l'instant l'accès au lapiaz a certes été limité (pose de barrières), mais les contrôles sont peu courants et les véhicules 4x4 sont toujours visibles sur le karst ou ses abords. Quant à l'inscription du site comme géotope d'importance communale, aucun pas n'a pour l'instant été fait dans ce sens. La résolution de l'opposition du WWF au plan de zones, pour laquelle la commune s'est attachée les services d'un géomorphologue, sera peut-être l'occasion d'une mise sous protection partielle du karst.

Au niveau de la **valorisation**, force est de constater qu'elle pourrait être plus poussée. Une brochure didactique existe bien, mais sa promotion est très lacunaire. Elle n'est par exemple pas toujours disponible à la Cabane de Prarochet et n'existe qu'en une seule langue. A la Cabane de Prarochet, pourtant située au coeur de la zone karstique, aucune information scientifique n'est disponible (par exemple, sous forme de panneaux). Finalement, les randonnées guidées sont organisées de manière très ponctuelle.

Pour pallier à ces déficits géotouristiques, l'Institut de Géographie de l'Université de Lausanne a mis sur pied un programme visant à créer à terme cinq produits géotouristiques intégrés :

- la brochure didactique *«* Tsanfleuron*, entre roche et glace »* existante, en français ;
- la réalisation d'une carte géotouristique de la région du Sanetsch, en plusieurs langues, avec des propositions de randonnées pédestres et des explications scientifiques, dans les domaines de la géomorphologie, de la glaciologie et du climat ;
- la réalisation d'un dépliant et d'un concept didactique audio disponible sur la ligne postale et portant principalement sur le retrait glaciaire ;
- la réalisation d'un centre de documentation et d'une exposition thématique sur le karst dans l'Hôtel du Sanetsch rénové ;
- la réalisation de posters didactiques sur le retrait glaciaire et sur le karst à la Cabane de Prarochet.

Ce programme sera réalisé graduellement en lien avec les acteurs touristiques et politiques de la région.

Bibliographie

Abegg B., König U., Maisch M. (1994). Klimaänderung und Gletscherskitourismus, *Geographica Helvetica*, 3, 103-114.

ASSN (1999). Inventaire des géotopes d'importance nationale, *Geol. Insubr.* 4/1, 25-46.

Berclaz M.A. (1977). Six ans de collaboration interclubs: le karst haut-alpin du Sanetsch, *Stalactite*, 27, 3-13.

Berrebi Y. (en cours). *Evaluation de sentiers didactiques en géomorphologie*, Université de Lausanne, Institut de Géographie, mémoire de licence.

Collectif (1995). *Tsanfleuron*, Commune de Savièse, Commission culturelle, brochure didactique, 64 p.

Commune de Savièse (2000). *Plan de gestion du Sanetsch. Mise en valeur des richesses du site*, Savièse, Commune de Savièse, Rapport non publié [mandat réalisé par le bureau Arcalpin, Sion].

Corbel J. (1957). Karsts hauts-alpins, *Rev. Géogr. Lyon,* 32, 135-158.

Decrouez D., Jordan P., Auf der Maur F. (2003). *Géotopes. Un voyage dans le temps*, Fribourg, Ed. MPA.

Hallet B., Lorrain R., Souchez R. (1978). The composition of basal ice from a glacier sliding over limestones. *Geol. Soc. of America Bull.* 89, 314-320.

Hubbard B. (2002). Direct measurement of basal motion at a hard-bedded, temperate glacier: Glacier de Tsanfleuron, Switzerland, *Journal of Glaciology*, 48(160), 1-8.

Hubbard B., Hubbard A,. Tison J.-L., Mader H.M., Nienow P., Grust K. (2003). Spatial variability in the water content and rheology of temperate glaciers: Glacier de Tsanfleuron, Switzerland, *Annals of Glaciology*, 37, 1-6.

Hubbard B., Hubbard A. (1998). Bedrock surface roughness and the distribution of subglacially precipitated carbonate deposits: implications for formation at Glacier de Tsanfleuron, Switzerland, *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 261-270.

Hubbard B., Tison J.L., Janssens L., Spiro B. (2000). Ice-core evidence of the thickness and character of clear-facies basal ice : Glacier de Tsanfleuron, Switzerland, *Journal of Glaciology,* 46/152, 140-150.

Kunz F. (1982). *Etude géologique de la région du Col du Sanetsch*, Université de Lausanne, Institut de Géologie, Travail de diplôme non publié.

Lambotte A. (1995). *Elaboration scientifique d'un sentier glaciologique sur le site de Tsanfleuron*, Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences, Mémoire de licence non publié.

Lemmens M., Lorrain R., Haren J. (1982). Isotopic composition of ice and subglacially precipitated calcite in an alpine area, *Zeitschr. für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 18, 151-159.

Lugon R., Reynard E. (2003). Pour un inventaire des géotopes du canton du Valais, *Bull. Murithienne*, 121, 83-97.

Maire R. (1976). *Recherches géomorphologiques sur les karsts haut-alpins des massifs de Platé, du Haut-Giffre, des Diablerets et de l'Oberland occidental,* Thèse, Université de Nice.

Maire R. (1977). Les Karsts haut-alpins du Platé, du Haut-Giffre et de la Suisse occidentale, *Rev. de Géographie Alpine,* 65, 403-425.

Maire R. (1978). Les karsts sous-glaciaires et leurs relations avec le karst profond, *Rev. de Géographie Alpine,* 66, 139-148.

Maire R. (1990). *La haute montagne calcaire*, Karstologia Mémoires, N° 3.

Masotti D. (1997). Potabilité de l'eau du Karst de Tsanfleuron, *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, 1997, Switzerland*, Symposium 5 : Applied Speleology, 9-12.

Panizza M., Piacente S. (1993). Geomorphological assets evaluation, *Zeitschr. für Geomorphologie N.F.*, Suppl. Bd. 87, 13-18.

Pralong J.-P. (2005). A method for assessing tourist potential and use of geomorphological sites, *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 3, 189-196.

Pralong J.-P., Lugon R., Reynard E. (2005). Creation of new protected areas in Switzerland : an opportunity to promote the tourist value of geomorphosites ? A case study in the Muverans Range, Swiss Alps, *6th Int. Conf. Geomorphology, Zaragoza*, Abstract volume, 493.

Reynard E. (1992). *Géomorphologie de la vallée de la Morge (Valais*), Université de Lausanne, Institut de Géographie, Mémoire de licence non publié.

Reynard E. (1997a). Carte géomorphologique des Lapiés de Tsanfleuron (Hautes Alpes Calcaires, Valais), *Bull. de la Société Neuchâteloise de Géographie* 41, 23-38.

Reynard E. (1997b). Problèmes liés à la mise en valeur touristique d'un site karstique. Le cas du karst de Tsanfleuron (VS, Suisse), *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, 1997, Switzerland*, Symposium 5 : Applied Speleology, 17-19.

Reynard E. (2004a). Geosites, in : Goudie A.S. (ed.). *Encyclopedia of Geomorphology*, London, Routledge, p. 440.

Reynard E. (2004b). Géotopes, géo(morpho)sites et paysages géomorphologiques, in : Reynard E., Pralong J.-P. (éds.). *Paysages géomorphologiques*, Lausanne, Institut de Géographie, Travaux et Recherches n°27, 123-136.

Reynard E. (2004c). *Tsanfleuron, entre roche et glace. Une invitation à la découverte géomorphologique du karst de Tsanfleuron*, Commune de Savièse, Commission des relations publiques et tourisme, brochure didactique, 64 p.

Reynard E., Morand S., Ammann Th. (2003). Protection et mise en valeur d'un site géomorphologique : la région du Sanetsch (Valais, Suisse), in : Reynard E. et al. (éds.). *Géomorphologie et tourisme*, Actes de la Réunion annuelle de la Société suisse de géomorphologie, Finhaut, 21-23 septembre 2001, Lausanne, Institut de Géographie, Travaux et Recherches n°24, 35-52.

Sharp M., Campbell Gemmel J., Tison J.L. (1989). Structure and stability of the former subglacial drainage system of the Glacier de Tsanfleuron, Switzerland, *Earth Surface Processes and Landforms*, 14, 119-134. Souchez R.A., Lemmens M. (1985). Subglacial carbonate deposition: an isotopic study of a present-day case, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 51, 357-364.

Wipf A. (1999). *Die Gletscher der Berner, Waadtländer und nördlichen Walliser Alpen. Eine regionale Studie über die Vergletscherung im Zeitraum « Vergangenheit » (Hochstand von 1850), « Gegenwart » (Ausdehnung im Jahr 1973) und « Zukunft » (Gletscherschwund-Szenarien, 21. Jhdt.)*, Universität Zürich, Geographisches Institut, Physische Geographie Vol. 40.

Changement climatique et gestion durable de l'approvisionnement en eau potable d'une région karstique : la Vallée de Joux (Vaud, Suisse)

Géraldine, BISSIG
Institut de Géographie, Université de Lausanne
Quartier Dorigny, Bâtiment Humense
CH – 1015 Lausanne
Geraldine.Bissig@unil.ch

Résumé

Comme toute région, la Vallée de Joux (VD) ne va pas échapper aux effets liés aux changements climatiques. Dans une région karstique où les ressources en eau sont fragiles et vulnérables, les changements pourraient affecter non seulement la quantité mais aussi la qualité de l'eau. En vue d'une gestion durable de l'approvisionnement en eau potable à la Vallée de Joux, nous avons mené une recherche orientée tant sur les impacts climatiques en matière de disponibilité de l'eau que sur sa qualité. Nous avons étudié les deux cas suivants : les effets d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies et de l'augmentation des périodes sèches. Notre attention a également été dirigée sur l'organisation politico-administrative actuelle des sept Services des Eaux de ce district, dont certains approvisionnent seulement quelques centaines d'habitants. On a relevé des insuffisances au niveau de la gestion des ressources en eau et des ressources financières. Ces insuffisances compromettent une gestion durable. Une restructuration de la distribution de l'eau semble donc nécessaire afin de faire face aux exigences du futur.

Abstract

Like any area, the Vallée de Joux (VD) will not escape the effects related to the climatic changes. In a karstic area where the water resources are fragile and vulnerable these changes could affect not only the quantity but also the quality of water. For a sustainable development of the drinking water supply of this area, the research was directed as well towards the climatic impacts as regard availability of water as on its quality. We studied the two following cases: the effects on an increase in frequency and intensity of precipitations and of the increase of dry periods. Our attention was also directed on the current political organization of the seven water distributors of this district, of which some do not supply more than a few hundreds of inhabitants. One raised certain insufficiencies on the level of the efficient management of the water and the financial resources which compromise a sustainable development. A reorganization of the water distribution seems necessary to be able to face the requirements of the future.

1. Introduction

La Vallée de Joux a été au centre d'une étude portant sur la gestion durable de l'approvisionnement en eau potable d'une région karstique (Bissig 2004). Le modelé karstique influence de façon déterminante le système hydrographique de la Vallée de Joux. Celui-ci s'est développé au cours de millions d'années de karstification de la structure géologique calcaire qui forme à cet endroit les plis remarquablement parallèles de la Chaîne du Jura (Blant et al. 2001).

Les ressources en eau proviennent des deux grandes sources karstiques du Brassus et de la Lionne ainsi que des sources secondaires situées aux Bioux, à l'Orient, au Séchey et aux Charbonnières. A côté de l'exploitation de ces sources, des puits (au Pont, au Lieu et à la Golisse) ont été aménagés dans des graviers fluvio-glaciaires ou lacustres pour exploiter les nappes phréatiques (figure 1).

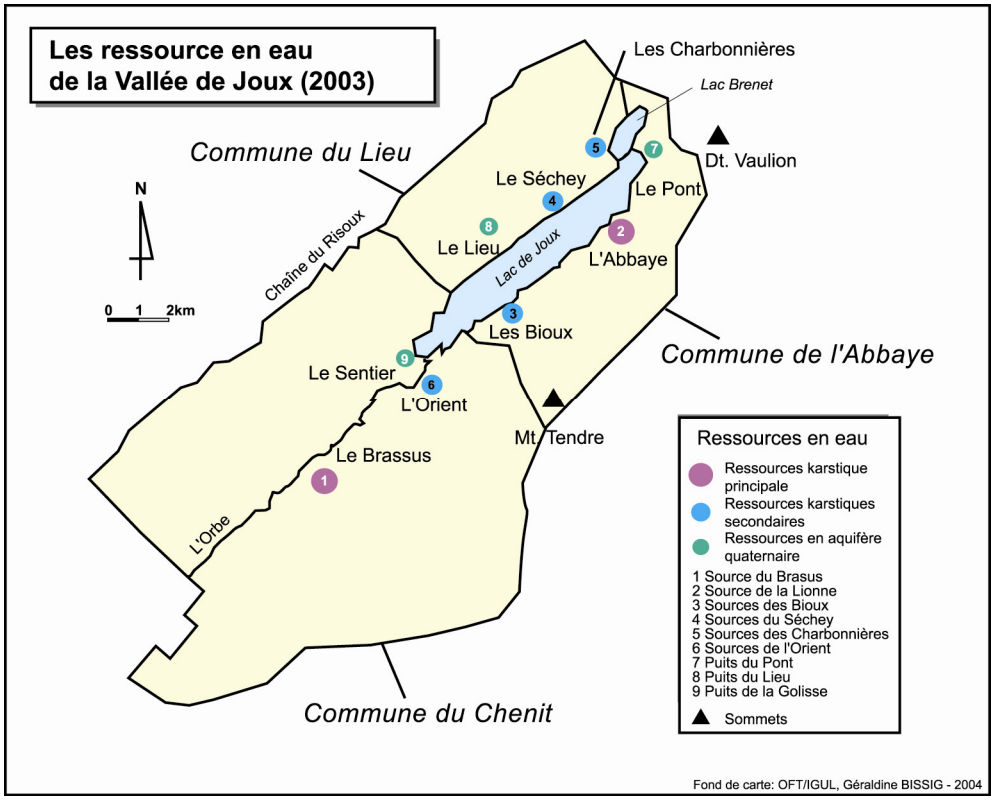


Figure 1. Carte des principales ressources en eau à la Vallée de Joux.

Les caractéristiques principales communes à toutes les sources karstiques sont leur vulnérabilité face à la pollution d'origine ponctuelle (ex. gouffres-poubelles) aussi bien que diffuse (ex. activité agricole) et l'apport d'eau très fortement variable selon les conditions météorologiques (Ford et Williams 1989). Le changement climatique risque de perturber le régime des eaux et

d'exercer une influence sur la qualité de l'eau. En Suisse, au cours du XXème siècle, une augmentation significative des précipitations hivernales et des saisons de transition (printemps et automne) est perceptible, ainsi que leur intensification (Rebetez 2002). En lien avec l'augmentation de la température, les sécheresses devraient également s'accentuer à cause de l'évapotranspiration accrue. Combinée à une diminution générale des précipitations estivales, la pression sur la ressource en eau risque de s'accroître pendant les mois d'été et de provoquer localement des pénuries d'eau (Rebetez 2003). Sur la base de ces indications générales, une recherche a été menée visant l'approfondissement des connaissances en matière d'impacts du changement climatique sur les ressources en eau de la Vallée de Joux (Bissig 2004).

Cette région n'a pas seulement été choisie pour son caractère karstique, mais également pour sa particularité en ce qui concerne la gestion de l'approvisionnement en eau potable. Si, dans l'une des trois communes du district de la Vallée, la gestion est l'affaire des autorités communales (Le Chenit), elle relève des autorités villageoises dans les deux autres (L'Abbaye et Le Lieu). Ainsi, pour un total d'un peu plus de 6000 habitants, ce sont sept Services des Eaux indépendants qui opèrent (tableau 1). Il s'agit d'un nombre plutôt élevé si l'on considère les coûts et investissements conséquents de ce type de service. Parallèlement aux recherches menées sur la qualité et la disponibilité de l'eau, les différents modes de gestion ont été étudiés sous l'angle de la sécurité et de la durabilité de l'approvisionnement en eau potable.

Commune	**Village**	**Gestionnaire du réseau d'eau potable**	**Habitants ***
Le Chenit			4073
	tous les villages de la commune	Service des Eaux de la Commune du Chenit	
L'Abbaye			1243
	Le Pont	Service des Eaux du village du Pont	
	L'Abbaye	Service des Eaux du village de l'Abbaye	
	Les Bioux	Service des Eaux du village des Bioux	
Le Lieu			823
	Le Séchey	Service des Eaux du village du Séchey	
	Les Charbonnières	Service des Eaux du village des Charbonnières	
	Le Lieu	Depuis printemps 2004, géré par la commune du Lieu	
		Total :	6139

Tableau. 1 Les différents services des eaux à la Vallée de Joux.
(Nombre d'habitants, fin 2003. Source : http://www.communal.ch)*

2. La qualité de l'eau en fonction des situations météorologiques extrêmes

2.1 Impacts des précipitations intenses sur la qualité de l'eau

Le relief du Jura étant beaucoup moins accentué que celui des Alpes et le système hydrographique plus absorbant, les effets de l'augmentation de la fréquence des précipitations intenses en termes de laves torrentielles, glissement de terrains et inondations seront moins important que dans les Alpes. Par contre, une dégradation de la qualité de l'eau liée à un lessivage du sol suite à une épisode de précipitation intense est une hypothèse à considérer. Afin de mesurer la variabilité de certains paramètres physico-chimiques et bactériologiques susceptibles de varier avec l'augmentation de l'intensité des précipitations et d'être représentatif au niveau de la dégradation de la qualité en ce qui concerne la potabilité, des analyses faites par le Laboratoire Cantonal (VD) ont été mises en relation avec des relevés météorologiques et des mesures du débit des sources.

En ce qui concerne la présence de micro-organismes pathogènes, une corrélation positive a pu être démontrée pour les analyses d'eau faites pendant le semestre d'été sur la source de la Lionne (Commune de l'Abbaye, figure 2). Cette corrélation montre un accroissement de la concentration en micro-organismes pathogènes lors de fortes précipitations pluvieuses, car celles-ci favorisent un lessivage rapide du sol.

En revanche, pendant le semestre d'hiver, les concentrations d'Escherichia Coli sont beaucoup moins importantes (figure 2). Cette différence entre les saisons est due à l'absence d'activité agricole sur les anticlinaux au cours de l'hiver. A cette époque de l'année, il n' y a donc pas d'épandage de fumier ni de lisier sur les anticlinaux de la région. Les conditions météorologiques hivernales favorisent également la baisse des concentrations d'Escherichia Coli. En effet, le gel rend le sol imperméable et les précipitations tombent uniquement sous forme de neige.

Les résultats émanant des calculs d'interdépendance entre les débits de la Lionne et les valeurs de turbidité sont également concluants. La turbidité augmente et diminue simultanément à l'accroissement et à la réduction du débit. Lors de fortes crues, le taux de turbidité peut dépasser largement les valeurs de tolérance indiquées pour l'eau brute destinée à la consommation (valeur limite : 1.0 UT/F, Ordonnance fédérale du 26 juin 1995 sur les substances étrangères et les composants, réf. 817.021.23).

Les tests effectués sur les sources secondaires semblent indiquer une sensibilité moindre aux variations météorologiques. Cependant, vu le nombre restreint d'analyses d'eau à disposition, des conclusions déterminantes ne sont pas possibles. En tenant compte des résultats obtenus par des analyses statistiques effectuées sur des données météorologiques (Le Sentier : 1901-

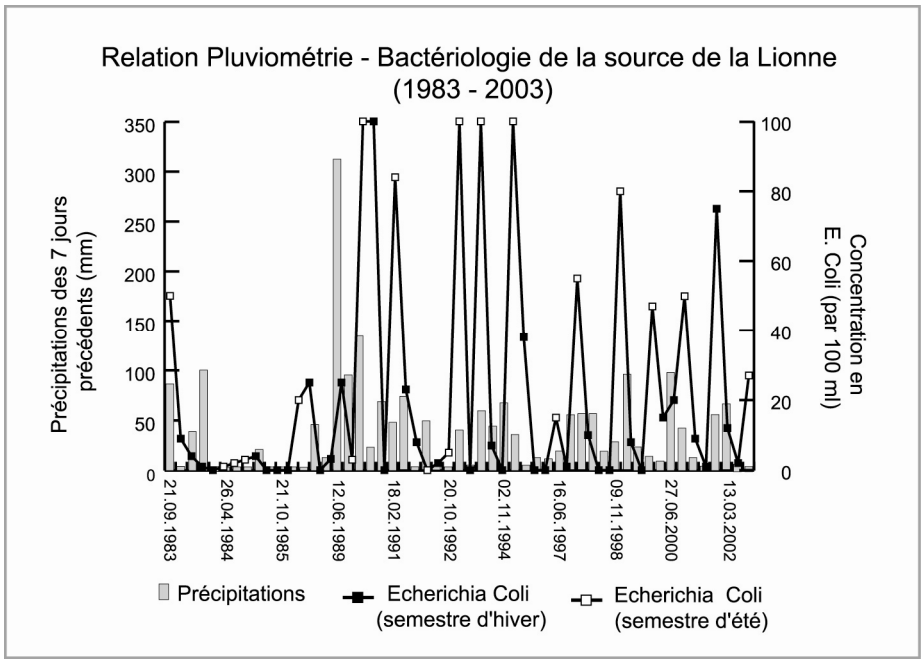


Figure 2: Lien entre la pluviométrie et les concentrations d'Escherichia Coli de la source de la Lionne entre 1983 et 2003. (Sources : MétéoSuisse et rapports d'analyses microbiologique du Laboratoire cantonal)

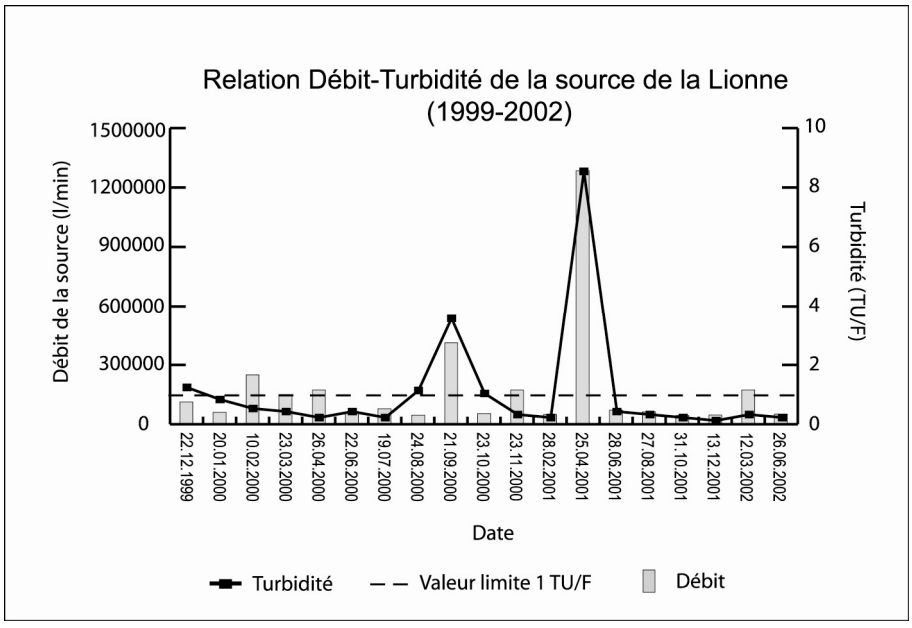


Figure 3 : Lien entre la pluviométrie et les valeurs de turbidité de la Lionne entre 1999 et 2002. (Sources : MétéoSuisse et analyses effectuées par l'Office fédérale des eaux et de la géologie dans le cadre du projet NAQUA: réseau national d'observation de la qualité des eaux souterraine)

1995 et Les Bioux : 1996-2003, MétéoSuisse) qui ont montré une augmentation significative des précipitations mensuelles pendant le semestre d'hiver ainsi qu'une intensification des précipitations journalières pendant le même semestre (Bissig 2004), il est probable que les sources karstiques secondaires soient également touchées par les événements d'eau turbide et une certaine dégradation bactériologique.

2.2. Périodes sèches et qualité de l'eau des sources karstiques

On observe une variation importante du débit des différentes sources lors de périodes sèches. Dans le cadre de cette étude, nous voulions savoir si la situation d'étiage des sources a pour conséquence une dégradation de la qualité de l'eau par manque de dilution. Comme méthode indirecte de vérification de cette éventualité, les origines des pollutions survenues à la Vallée de Joux et les situations météorologiques correspondantes à ces périodes ont été étudiées. Trois grandes contaminations ont touché la région entre 1989 et 1991 : deux pollutions de la source du Brassus en 1989 (Herter et Wiesmann 1989) et 1991 (L'HEBDO 17.10.1991) et la pollution du puits du Pont en 1989 (Parriaux et Mayoraz 1989).

Bien que l'année hydrologique 1988-1989 ait été fortement déficitaire, -390.7 mm au Brassus par rapport à la moyenne entre 1969-1991, et -333 mm aux Charbonnières par rapport à la moyenne entre 1982-2003, il ne s'agit pas pour les deux cas de pollutions déclenchées par des facteurs naturels, mais bien de contaminations d'origine humaine.

Une mauvaise manœuvre de vidange d'une fosse à purin est à l'origine des pollutions de la source du Brassus (1989 : environ 100'000 litres ; 1991 : environ 50'000 litres de lisier). Au Pont, l'infiltration de 1000 litres d'hydrocarbures issus d'une locomotive déraillée à une vingtaine de mètres du puits a nécessité l'arrêt immédiat de son exploitation, privant la population du village du Pont de sa principale adduction. Parriaux et Mayoraz (1989) qui ont établi les probabilités d'occurrence d'une situation pareille à celle de 1989 fixent la période de retour relative à la collision de locomotives en gare du Pont à environ 100 ans. En ce qui concerne les mauvaises vidanges d'une fosse, elles ne devraient pas se produire plus couramment que tous les 30 ans, alors qu'une situation d'étiage marqué survient en moyenne tous les 10 ans.

Les conclusions que l'on peut tirer de l'examen des trois pollutions sont qu'elles ne peuvent pas être attribuées à la situation d'étiage des sources (en 1991 il y avait même un surplus pluviométrique), mais qu'elles doivent plutôt être interprétées comme accidentelles. Sous réserve de résultats d'examens plus poussés, le risque de dégradation « naturelle » de la qualité de l'eau due aux périodes sèches, qui actuellement ne montrent aucune tendance à une augmentation, ne semble pas très important à la Vallée de Joux.

3. Disponibilité de la ressource en eau à la Vallée de Joux

L'été caniculaire de 2003, a servi d'exemple pour examiner la disponibilité de l'eau à la Vallée de Joux. Pour mieux tenir compte de la topographie du terrain il a été fait une distinction entre le fond de la Vallée où sont situés les villages et les anticlinaux sur lesquels se trouvent les estivages.

3.1 Disponibilité de l'eau au fond de la Vallée

La distribution d'eau potable a connu plusieurs événements inhabituels qui vont d'un approvisionnement prolongé du réseau du village des Bioux par celui de la commune du Chenit à l'interruption de l'exploitation du puits du Lieu.

Si la ressource en eau, dans son ensemble, est suffisante pour alimenter tous les villages de la commune sans restrictions de consommation lors d'une situation de déficit pluviométrique, ce n'est pas le cas pour les différentes localités comme Les Bioux et L'Orient. L'alimentation du réseau des Bioux par le réseau du Sentier a été particulièrement longue en 2003, s'étendant sur une période de trois mois au lieu du mois habituel (Lecoultre 2003). Le puits du Pont, qui alimente le village du même nom, a connu un abaissement progressif de la nappe d'un mètre cinquante sous le niveau habituel. Vu que la nappe phréatique est dépendante du niveau du Lac de Joux et du Lac Brenet, et non directement de conditions météorologiques, on ne s'attend toutefois pas à ce que le puits s'assèche complètement.

Une mauvaise surprise est cependant survenue au Lieu où l'eau est prise d'un aquifère de taille modeste dont la recharge est discontinue dans le temps ce qui le rend très sensible aux conditions climatiques (Parriaux 1993). Le déficit pluviométrique, combiné à une consommation importante, a poussé le rendement de la nappe vers ses limites. Afin de compenser le manque d'eau au village du Lieu, celle-ci a été temporairement acheminée à travers la conduite régionale reliant Le Lieu aux Charbonnières et au Pont. L'exploitation du puits du Lieu n'a repris qu'en octobre 2003, dès la recharge de l'aquifère après d'importantes chutes de pluie.

L'observation des enregistrements météorologiques des années 2001 à 2003 offre une explication à ces événements inhabituels (tableau 2). L'année hydrologique 2002/2003 cumule seulement un léger déficit pluviométrique de -59,6 mm par rapport à la moyenne de la période de comparaison (1982-2003). Mais cette année-là est particulière en ce qui concerne les températures. On a pu calculer un excès d'environ 3℃ au-dessus de la moyenne, ce qui a fortement influencé l'évaporation et l'évapotranspiration des réserves d'eau qui étaient déjà basses en raison d'un déficit pluviométrique élevé durant l'année hydrologique précédente, en 2001-2002 (-249,8 mm en 2001/2002 par rapport à la moyenne entre 1982-2003).

3.2. Disponibilité de l'eau sur les alpages

Sur les territoires communaux qui montent jusqu'aux crêtes de l'anticlinal du Risoux (Le Lieu, Le Chenit) et du Mont Tendre (L'Abbaye, Le Chenit), de nombreux alpages sont exploités pendant la période estivale. De par les caractéristiques karstiques de la région, les points d'eau sont extrêmement rares sur les anticlinaux et les conduites des réseaux de distribution de l'eau potable n'arrivent qu'exceptionnellement jusqu'aux fermes ou buvettes d'alpages. Les agriculteurs se sont dotés depuis longtemps d'un système de récupération des eaux pluviales à l'aide duquel l'eau récoltée sur les toits des fermes ou des bâtiments conçus à cette fin, est stockée dans de grandes citernes pouvant contenir environ 40'000 à 100'000 litres d'eau (figure 4).

	Précipitations annuelles (mm)	Anomalie 1	Anomalie 2
Année hydrologique 2002-2003 Charbonnières	1661.7	-59.6	+3
Année hydrologique 2001-2002 Charbonnières	1471.5	-249.83	Très proche de la moyenne

Tableau 2 : Caractéristiques des années hydrologiques de 2001-2003. (MétéoSuisse : Le Brassus : 6020, Les Charbonnières : 6038, La Chaux-de-Fonds: 8545)

Anomalie 1 : Anomalie par rapport à la moyenne des précipitations annuelles (mm) (Charbonnières : 1982-2003)
Anomalie 2 : Anomalie par rapport à la moyenne de température maximale (°C) (La Chaux-de-Fonds : 1982-2003)

Les besoins en eau sur les alpages (abreuvement du bétail et production fromagère, approvisionnement en eau potable des restaurants et des buvettes) sont très importants et les réserves rapidement épuisées lorsque la pluie fait défaut. Des transports d'eau du fond de la vallée aux alpages (l'eau provient principalement des deux grandes sources de la Lionne et du Brassus) sont affaire courante. Ainsi, chaque année, selon les conditions météorologiques, des volumes plus ou moins importants d'eau sont déplacés.

Lors de l'été 2003 la pénurie d'eau a été grave. Sous l'opération nommée "Aquaconcert", l'armée est intervenue en transportant du 20 août au 1er septembre 2003, 500 mètres cube en moyenne journalière. Les 20'000 kilomètres parcourus traduisent une activité qui *« s'est développée sur toute la longueur de l'Arc Jurassien vaudois puisque autant les estivages situés derrière la Dôle que ceux placés au dessus de Provence ont été desservis* » (GEST'ALPE info).

Figure 4. Ouvrage de récupération de l'eau de pluie près de la buvette de la Dent de Vaulion.

Même si une augmentation de la fréquence des périodes sèches et des sécheresses n'est pas en vue à l'heure actuelle, l'exemple mentionné ci-dessus montre que pendant des années ou succession d'années avec un déficit pluviométrique, la situation pour les alpages sur les anticlinaux devient vite difficile. La solution des transports généralisés et répétés d'eau de la vallée vers les alpages est, du point de vue de la durabilité de ces actions, peu optimale. Le raccordement des alpages aux réseaux de distributions communaux n'est, pour le moment, envisagé que par la commune du Lieu qui prévoit de raccorder les alpages sur son territoire aux réseaux de distribution d'eau potable à partir du puits du Lieu. Par rapport à ce qui a été dit précédemment sur la capacité du puits du Lieu, on se demande s'il sera capable de fournir les quantités requises lors d'étés extrêmement secs. Les investissements que représente un raccordement sont jugés trop importants par les autres communes, qui ont cherché une solution dans la construction d'étangs de rétention (Commune du Chenit). On augmente ainsi la capacité de stockage de l'eau de pluie directement dans la zone où l'eau sera par la suite utilisée, diminuant ainsi considérablement la distance de transport.

4. Une nouvelle organisation de l'approvisionnement en eau potable

4.1. L'étude de régionalisation

L'été caniculaire 2003 a montrée l'importance de l'interconnexion des réseaux. Il existe, pour la Vallée de Joux, un concept régional de la distribution de l'eau élaboré en 2000 (Herter et Wiesmann 2000). L'étude de régionalisation, dans une vision plus globale et plus lointaine de l'organisation de la distribution de l'eau potable du district, suggère des changements importants afin de permettre une exploitation optimale des ressources et des réseaux.

Parmi les améliorations et ajustements techniques prioritaires, on compte l'uniformisation des régimes de pression, c'est-à-dire une mise en charge de tous les réseaux à une cote uniforme de 1090 m. Ceci afin d'obtenir une pression adéquate chez l'utilisateur (1 à 5 bar) et aux postes de défense contre l'incendie (3 à 6 bar) et améliorer ainsi la situation précaire à l'Orient, à la Golisse, aux Bioux, à l'Abbaye, aux Charbonnières et au Séchey : des réseaux qui aujourd'hui disposent d'une pression insuffisante. La mise en circulation de l'eau dans un réseau régional et l'amélioration de la qualité de l'eau à l'aide de nouvelles stations de traitement et de zones de protection adéquates, afin de réduire le risque de pollution au maximum, sont également nécessaires. Par souci d'efficacité financière, les auteurs du concept évoquent également la possibilité d'abandonner certaines ressources secondaires.

Sur le plan organisationnel, le concept propose la création d'un Service intercommunal intégrant tous les réseaux du district. Afin de gérer avec un seul distributeur responsable l'approvisionnement en eau potable de tout le district, une nouvelle organisation sous forme d'entente régionale, de société anonyme ou d'association de communes est envisageable.

4.2. Arguments pour et contre une régionalisation

Une régionalisation de la distribution de l'eau semble avantageuse pour des raisons techniques, financières et organisationnelles. En ce qui concerne le premier aspect, des conditions hydrauliques rénovées et une amélioration de la qualité de l'eau pourraient être obtenues. Sur le plan financier l'abandon d'ouvrages vétuste éviterait des assainissements coûteux. Grâce à la régionalisation, l'amortissement des installations restantes et nouvelle, par une exploitation rationnelle et efficace de celles-ci, serait meilleur. Finalement, le développement planifié de la production et de la distribution de l'eau permettrait de mieux suivre l'évolution démographique, économique et climatique. Malgré ces arguments convaincants, tous les distributeurs ne se montrent pas favorables à un tel changement de l'organisation actuelle.

Parmi les arguments avancés par les petits distributeurs, celui de la perte de l'autonomie du village semble le plus important. Dans le cadre d'un Service intercommunal des Eaux, les fractions de communes (villages) perdraient les entrées provenant de la vente d'eau. Ces entrées financières sont indispensa-

bles au fonctionnement de ces entités politiques primaires. Abandonner le Service des Eaux implique dès lors une remise en question du système et de l'avenir des fractions de communes. Dans une région où les villages forment des entités bien ancrées dans les mentalités locales et jouent un rôle indéniable dans les activités sociales des habitants, l'hésitation vis-à-vis de ce projet est compréhensible.

Sur un autre plan, l'association de plusieurs entités n'est jamais évidente, d'autant plus si les différences entre elles sont importantes (ici : écarts flagrants en ce qui concerne l'état des réseaux de distribution). L'intérêt face à une fusion dépend également du bénéfice que l'on croit pouvoir en tirer. A ce sujet, il semble évident que ceux qui ont un réseau déficient peuvent mieux en tirer profit que ceux possédant un réseau déjà moderne. Un autre sentiment de réticence émane du fait que les petites unités ont peur de perdre leur influence en s'incorporant dans une association avec de grandes unités. On saisit là toute l'importance de l'aspect psychologique qui, face à toute argumentation rationnelle, peut parfois peser lourdement sur la décision et l'avancement des projets. La mentalité évolue désormais à une autre vitesse que les exigences sur le terrain.

Un facteur déclenchant pourrait, dans cette ambiance générale d'attente, relancer le débat sur la régionalisation. On entend par là des pressions d'ordre financier (investissements inévitables dans des moyens techniques hors d'atteinte des petits distributeurs), sanitaire (mise hors service d'installations vétustes et intolérables sur le plan sanitaire) ou naturel (pollutions, répétition d'un manque d'eau suite à des périodes sèches) qui forceraient les responsables à prendre des mesures.

Vu les arguments évoqués ci-dessus contre la régionalisation, la réforme de la distribution de l'eau devrait, selon les connaissances acquises lors d'entretiens avec les responsables (Bissig 2004), être accompagnée d'une réflexion profonde sur l'organisation politique des communes et des tâches attribuées aux fractions de communes puisque, mis à part les considérations de régionalisation de la distribution de l'eau, leur avenir est incertain. A moyen terme, des difficultés financières et le manque d'intérêt des villageois à s'engager dans la politique locale menacent la pérennité de ces entités politiques. La remise en question des structures actuelles pour concevoir de nouvelles formes de fonctionnement est indispensable pour trouver des solutions capables de convaincre toutes les parties.

5. Conclusions

L'analyse des situations météorologiques particulières a mis en évidence la vulnérabilité de certaines ressources tant au niveau qualitatif qu'au niveau quantitatif.

En ce qui concerne la qualité de l'eau lors de situations de fortes précipitations, les variations de ses différentes composantes sont surtout perceptibles dans les principales sources karstiques comme le Brassus et la Lionne. Les problèmes relatifs à ces deux sources sont connus de longue date et l'autorité cantonale a exigé de nouveaux ouvrages de traitement, qui ont été réalisés au Chenit et dont la construction, pour des raisons financières, n'a pas encore été entamée à l'Abbaye. Selon nos observations, les ressources secondaires réagissent dans une moindre mesure et les autorités cantonales n'ont formulé

aucune demande de réfection ou de construction de station de traitement auprès des autres Services des Eaux pour le moment. Cependant, les systèmes de traitement ne sont pas des plus modernes. C'est pourquoi une surveillance de l'évolution de la qualité de l'eau des ressources semble opportune et permettrait en même temps de mieux connaître la vulnérabilité de ces ressources karstiques secondaires.

Sur le plan quantitatif, on ne doit pas craindre un manque d'eau généralisé à la Vallée de Joux, puisque les ressources d'étiage de la région, actuellement de 4650 litres/minute sont suffisantes pour alimenter sans problème l'ensemble de la population (Herter et Wiesmann 2000). Il existe même des ressources potentiellement exploitables comme les deux lacs, réserves non encore utilisées à cause de la mauvaise qualité de l'eau de surface qui demande un traitement coûteux. Par une amélioration technique des captages déjà en place on pourrait d'avantage augmenter la quantité d'eau disponible pour la région (Parriaux et Mayoraz 1992, Parriaux 1992). L'enjeu consiste dans la répartition de l'eau entre les régions excédentaires et déficitaires. Ceci devient d'autant plus important si l'inégalité s'accroît en raison d'une diminution considérable de débit d'étiage de plusieurs sources à la fois ou lors de mise hors service d'autres points d'eau, à l'image de la Lionne (arrêt d'exploitation fin 2003 à cause de structures de potabilisation insuffisantes). Un grand pas vers une répartition facilitée a déjà été fait avec la construction d'interconnexions entre les différents réseaux. Grâce à la création d'un seul Service intercommunal des Eaux à la Vallée de Joux, les infrastructures déjà en place pourraient, avec des améliorations techniques et organisationnelles, être mieux utilisées et permettre ainsi une exploitation durable des ressources. De même, une réflexion poussée et coordonnée sur l'ensemble de la Chaîne jurassienne devrait être entreprise concernant un approvisionnement durable en eau sur les alpages.

Remerciements

La réalisation de cet étude, menée dans le cadre d'un mémoire de licence, n'aurait pas été possible sans le soutient d'un grand nombre de personnes. Je tiens à remercie tout particulièrement le directeur du mémoire, Emmanuel Reynard. La bonne collaboration avec les autorités communales et les responsables des différents Services des Eaux de la Vallée de Joux a été indispensable pour bien mener les recherches. Mes remerciements vont également aux spécialistes S. Grossenbacher (Herter et Wiesmann Ingénieurs-Conseils SA), E. Raetz (Inspecteur cantonal des eaux), J-M. Fallot (Professeur de Climatologie à l'Université de Lausanne) et F. Bavaud (Professeur d'Informatique et de Méthodes Mathématiques à l'Université de Lausanne).

Bibliographie

Bissig G. (2004). *Changement climatique et gestion durable de l'approvisionnement en eau potable d'une région karstique : La Vallée de Joux (Vaud, Suisse*). Lausanne, Institut de Géographie de l'Université de Lausanne, mémoire de licence, non publié.

Blant M., Blant D., Buttler A., Gobat J-M., Jaquat M., Jeannin P-Y., Mulhauser B., Zaugg B. (2001). *Le Jura – Les paysages, la vie sauvage, les terroirs. Lausanne*, Delachaux et Niestlé.

Ford D.C., Wiliams P.W. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. London, Unwin Hyman.

Gest'Alpe info, (2003). Ravitaillement en eau des estivages du Jura vaudois par l'Armée. L'opération « communaux » a été fort appréciée ! *Gest'Alpe info* N°13.

Herter et Wiesmann (1989). *Rapport technique opérations de secours.* Vevey, non publié.

Herter et Wiesmann (2000). *Concept régional de la distribution de l'eau*. Vevey, non publié.

Lecoultre S. (2003). *Rapport d'activités 2003 du Service des Eaux de la Commune du Chenit*, Le Sentier, Service des Eaux, non publié.

L'Hebdo, 17.10.1991. *Vallée de Joux, Encore un peu de purin* ? 17-18.

Parriaux A. (1992). *Détermination des zones de protection des sources de La Sagne (Village du Séchey).* EPFL-Lausanne, GEOLEP, Etude No. 9104, non publié.

Parriaux A. (1993). *Village du Lieu. Prospection hydrogéologiques et détermination des zones de protection du puits « la Pièce ».* EPFL-Lausanne, GEOLEP, Etude No. 8707, non publié.

Parriaux A., Mayorraz R. (1989). Fragilité des ressources en eau du Jura ou le jeu des probabilités à la Vallée de Joux, in : Hommage à Daniel Aubert : un demi-siècle de recherches en sciences de la terre dans le Jura. Neuchâtel, *Bulletin de la Société neuchâteloise des sciences naturelles,* T. 113, 107-114.

Parriaux A., Mayorraz R. (1992). *Commune de l'Abbaye. Dimensionnement des zones de protection du puits du Pont*. EPFL-Lausanne, GEOLEP, Etude No. 8708, non publié.

Rebetez M. (2002). La Suisse se réchauffe : Effet de serre et changement climatique. Lausanne, Collection Le savoir suisse, Presses polytechniques et universitaires romandes.

Rebetez M. (2003). Les changements climatiques obligent à revoir la gestion de l'eau, La Revue Durable, n°7, 26-29.

Hydrographie et géomorphologie karstiques de la zone frontalière du département du Doubs (France) et du canton du Jura (Suisse)

Jean-Claude BOUVIER
2900 Porrentruy

Résumé

Cet article résulte d'un suivi des cours d'eau depuis une dizaine d'années et d'une confrontation avec des aspects hydrologiques et géomorphologiques sur un territoire de 800 km^2 environ. Il s'agit d'intégrer les recherches anciennes et les plus récentes, les rendus cartographiques divers, les observations empiriques du paysage karstique faites à travers la frontière franco-suisse. Un inventaire synthétique met en évidence les bassins karstiques grâce aux traçages principaux aboutissant aux sources karstiques ou résurgences importantes. Un repérage sur le terrain s'est concentré sur les vallées sèches et les déversoirs occasionnels. Pour ces derniers, il faut les distinguer, en eaux basses, des ruisselets, rus et ruisseaux à écoulement permanent et répertorier les tronçons d'assèchement des cours d'eau. Pour les vallées sèches, il en résulte notamment des propositions pour 6 types géomorphologiques et 5 réseaux remarquables. Trois documents (cartes) illustrent ces observations.

Abstract

This paper results from observation of streams since about ten years and from confrontation with hydrological and geomorphological aspects upon a region of about 800 km^2. We want to integer old studies, new researches, and various maps, as well as empirical observations made about the karst landscape through french-swiss border. A synthetic list suggests a delineation of the main karst groundwater basins based on tracing tests. Field investigations have been focused upon dry valleys and «occasional waterways». Those can be distinguished during low flow from little permanent streams. Dry sections of streams have also to be identified. We suggest the distinction of 6 geomorphological types of dry valleys. 5 remarkable systems are used as examples and presented by 3 illustrations (maps).

1. Introduction

La zone frontalière considérée suit la boucle du Doubs depuis Biaufond au sud, à 17 km à l'aval du Saut du Doubs. De Biaufond, la frontière occupe la rive droite sur le canton du Jura – et non au milieu de la rivière – sur 27 km. Puis sur 30 km, le Doubs forme l'extrémité de la boucle entièrement jurassienne. La zone frontière se continue jusque vers Saint-Hippolyte, à la confluence du Dessoubre, longe le bassin versant du Gland (Blamont-Hérimoncourt), le Territoire de Belfort en constituant la suite.

Sur la figure 1, la large ligne grise indique la limite topographique des bassins du Rhône et du Rhin. Le bassin rhodanien comporte évidemment le Doubs, venant du sud-ouest, puis à Montbéliard au nord-ouest, rencontre l'Allan ayant l'Allaine comme affluent (figure 1, E). Le bassin rhénan (figure 1) débute par la Sorne, affluent de la Birse qui se jette dans le Rhin en amont de Bâle.

La présente note vise à illustrer la présence de réseaux hydrographiques de vallées sèches réparties sur l'ensemble du territoire considéré et à relever quelques éléments de l'importance de ces formes, en particulier en relation avec l'écoulement actuel des eaux souterraines.

2. Bassins versants karstiques

La recherche des limites des bassins versants karstiques, d'intérêt fondamental pour l'alimentation en eau, dépend de la connaissance détaillée de la répartition des calcaires et des argiles, ainsi que de la fracturation affectant le substrat rocheux et des conduits (grottes) qui s'y sont développés. Pratiquement, seuls les écoulements souterrains, démontrés par des essais de traçages, permettent de préciser les limites.

Les principaux traçages, reportés sur les trois figures de cette note, résultent d'efforts remarquables réalisés ces 20 dernières années par de nombreux opérateurs des deux pays. En revanche, les références géologiques sont souvent anciennes pour la région présentée.

Le karst caractérise les régions calcaires par de nombreux phénomènes spéléologiques. Ce sont évidemment les gouffres, les cavernes, les ruisseaux souterrains, les pertes, etc. Les spéléologues francs-comtois et jurassiens poursuivent avec ténacité explorations et inventaires. Les pertes, les dolines et les gouffres servent évidemment aux infiltrations pour les traçages. Pour la région concernée, les gouffres les plus profonds sont :

- le gouffre des Bruyères (point « Br » sur la figure 1), profondeur 190 m, Villars-les-Blamont, département du Doubs, France ;
- le creux à Koby (point « Ko » sur la figure 1), profondeur 212 m, Lajoux, canton du Jura, Suisse

3. Vallées sèches et déversoirs occasionnels

Les vallées sèches, que chacun peut voir facilement, constituent un élément primordial du paysage karstique. Pour en assurer un inventaire, il a fallu retenir une définition de base. Les vallées sèches se présentent comme dépressions longues de plus d'un kilomètre, relativement étroites, sans écoulement permanent, d'une surface présumée drainante de plus de cent hectares. L'inventaire de base se fait à partir de cartes topographiques au 1:25'000. Mais la confrontation sur le terrain s'avère indispensable pour préciser des limites de pentes. En effet, les extensions urbanistiques camouflent singulièrement les détails du relief, de même que les réseaux de communication, les remblais agricoles, les anciennes décharges, etc. De telles formes, variées et peu naturelles, apparaissent particulièrement en forêt (c'est-à-dire à l'abri des regards...).

En outre, aussi bien sur les cartes françaises que suisses, peu de petits ruisseaux, indiqués comme étant pérennes, le sont effectivement. Il s'agit le plus souvent de déversoirs occasionnels, témoins d'un enfoncement du réseau hydrographique dans le karst. Ce phénomène naturel s'accélère par des interventions anthropiques : captages excessifs, travaux intempestifs dans les lits de cours d'eau, pose de conduites, construction de chemins, etc. De nombreux ruisselets se confondent avec des rus dont seuls les parcours amont, très raccourcis, demeurent pérennes. Ils se transforment ensuite en déversoirs occasionnels par hautes eaux, sinon les eaux collectées dans le bassin de réception disparaissent dès leur passage sur les calcaires.

Lors de fortes précipitations, le déversoir occasionnel se manifeste par un écoulement provisoire. Dans certains cas, il peut prendre l'allure d'un torrent impétueux. Il provoque alors des érosions dangereuses et on observe un charriage intense de matériaux terreux, pierreux et ligneux. Après un temps plus ou moins long, l'écoulement s'affaiblit puis disparaît.

Lors de l'établissement d'un inventaire de vallées sèches, les informations intégrant des périodes de basses eaux et de hautes eaux sont indispensables ; ceci demande, en particulier, des observations sur une année hydrologique à faible écoulement. Pour distinguer un cours d'eau d'un déversoir occasionnel, une brève investigation sur la présence de la faune benthique ou de mousses aquatiques fournit de précieuses indications. Il faut rappeler qu'en toute saison, il existe une faune benthique dans les cours d'eau. Celle-ci constitue un ensemble vivant, composé surtout de larves d'insectes inféodés au lit, d'une diversité variable qui s'effondre dans les cours d'eau pollués. Un appauvrissement important, par rapport aux peuplements d'amont ou d'aval, apparaît en cas d'assèchement, même de courte durée. De la rivière, des vols de certains insectes adultes remontent les vallées sèches, à la recherche d'un lieu de ponte et colonisent ainsi un ru. En revanche, dans un déversoir occasionnel, la faune benthique disparaît plus ou moins rapidement. En milieu karstique, pour des causes diverses, un cours d'eau peut s'assécher sur un tronçon et, par conséquent, se confondre avec le statut de déversoir occasionnel. Quelques cas sont présentés sur la figure 1 : le bief de Vautenaivre, affluent du Doubs, canton du Jura (« Va » sur la figure 1, zone A), ou la Creuse, affluent du Gland, département du Doubs (« Cr » sur la figure 1, zone D).

Sur la base de plusieurs inventaires de vallées sèches dans l'Arc jurassien, un essai de typologie prend forme, en relation avec l'enfoncement du réseau hydrographique du karst. Un classement évolutif peut s'établir comme suit :

1. Vallée sèche au sens strict, sans déversoir occasionnel ni rétention d'eau ;

2. Vallée sèche avec ou sans émergence de hautes eaux, mais présentant un déversoir occasionnel ;

3. Vallée sèche avec à l'aval une résurgence ou une source karstique suivie d'un cours d'eau ;

4. Vallée, avec dans sa partie supérieure un ru (ruisselet) disparaissant dans une perte, puis se prolongeant par une vallée sèche proprement dite, avec ou sans déversoir occasionnel ;

5. Variante du type poljé avec tourbières, marécages, étangs…

La présence d'eau permanente dans les vallées de types 4 et 5 présente souvent, aussi bien du côté français que suisse, des sites qui furent occupés par des constructions hydrauliques, comme des moulins. On en observe également des restes de structures souvent fugaces mais précieux, qui méritent protection au titre de patrimoine historique. Ces vallées sèches renferment souvent des géotopes (gouffres, dolines, sites spéléologiques…) ainsi que des biotopes (milieux aquatiques ou au contraire xérophiles), qui mériteraient une conservation durable.

4. Réseaux hydrographiques remarquables

Les réseaux de vallées sèches retiennent l'attention parce qu'ils sont spectaculaires, énigmatiques et complexes. Ils apparaissent comme étant les témoins d'un système fluviatile subaérien antérieur, lié vraisemblablement à des conditions périglaciaires lors des périodes froides du quaternaire. Les réseaux les plus remarquables, sur ce territoire karstique d'environ 800 km^2, se localisent sur la figure 1 par les lettres A, B, C, D, E.

Le poljé de Plain de Saigne (A) possède une perte spectaculaire contenant les restes d'un moulin. Des essais de traçage ont démontré des relations souterraines avec la source karstique du Theusseret (TH) à l'ouest, la résurgence des Moulins de Soubey (MS) au nord, la Sorne à l'est et topographiquement avec le ruisseau du Tabeillon (Ta), affluent de la Sorne (figure 1). Le poljé comprend des tourbières, des étangs et des mares. Le réseau entourant le poljé comporte des vallées sèches avec quelques défilés et canyons secs, superbes par leur épiderme « litho-végétal ». Une surface importante a un statut de réserve naturelle[25], ce qui assure une base légale à un développement durable du secteur.

[25] Concrètement :
- arrêté de 1972 du Conseil exécutif du canton de Berne
- arrêté de 1980 du Gouvernement du canton du Jura pour 1.2 km^2
- travaux dans la perte et les ruines du moulin par le Spéléo-club Jura
- interventions diverses en 1994-95 pour ½ mio de CHF.

A l'ouest (B), le plateau de Maîche (Doubs, France), faisant face aux Franches-Montagnes (Jura, Suisse), aboutit au Dessoubre, affluent du Doubs. Le Bief de Pran (BP), désignant une source karstique située à côté de la confluence du ruisseau de la Forge, constitue une « réplique » différente, mais parallèle à la source karstique du Theusseret à moins de 14 km au sud-est.

Le réseau de la Raie de Charbonney (Doubs, France, région « C » sur figure 1, bien visible sur la figure 2), comprend :

- La source karstique à la Forge de Soulce-Cernay (Fo), suivie de bassins récents de pisciculture, avec un déversoir occasionnel peu puissant, du moins dans sa partie inférieure, à la confluence du Doubs ;

- Des branches diverses de vallées sèches, s'étendant vers Trévillers et se continuant topographiquement au sud par le poljé « dessoubrien » du plateau de Maîche (B).

Au bas de la figure 2, sur la rive gauche du Doubs, un syndicat exploite le captage de la Blanche Fontaine (BF-D) alimentant de nombreuses communes françaises. Un peu plus au nord, une vallée sèche avec déversoir occasionnel est traversée par deux traçages aboutissant audit captage.

La zone D (figure 1), sur le versant de la rive droite du Doubs, présente une remarquable diversité hydrologique, géomorphologique et géologique, liés à un enchevêtrement de fractures et de chevauchements au nord de Vaufrey (figure 2) :

- Le bassin fermé, constitué par Damvant, Réclère et en plus partiellement Rocourt (Ro, Jura, Suisse), alimente à travers l'anticlinal du Lomont, la Ronde Fontaine (RF) à Montjoie-le-Château (Doubs, France), sur la rive droite du Doubs. Les eaux souterraines provenant des vallées sèches de Grandfontaine (2 km à l'ouest de Rocourt) et partiellement de Rocourt et Fahy (Fa, figure 1 et 3) parviennent à la source karstique de la Doue (Do), donnant naissance au Gland, affluent du Doubs à Audincourt (Doubs, France);

- Un peu plus au sud-ouest (figure 2), entre Montjoie-le-Château et Damvant, se développe un assemblage très varié de formes qui longe la frontière franco-suisse avec notamment un karst ruiniforme et un cortège de toutes les structures géomorphologiques ;

- Enfin, plus au nord, séparé par un faisceau remarquable de failles et riche en gouffres de plus de 20 m de profondeur, un autre réseau aboutit à la Creuse (Cr), petit affluent du Gland (Bouvier 2001).

Le réseau de vallées sèches de l'Ajoulote (Jura, Suisse, figure 3), rivière souterraine partiellement explorée à partir du regard constitué par l'estavelle du Creugenat, arrive à la résurgence de la Beuchire (BE) à Porrentruy. Ce réseau, un modèle du genre, est en étude depuis quelques années dans le cadre de la construction de l'autoroute A16 et fait actuellement l'objet de nombreuses recherches sur le terrain. L'axe principal du réseau va d'ouest en est, avec latéralement treize vallées, y compris trois rus, et aboutit dans la vallée de l'Allaine.

En période de hautes eaux de l'estavelle s'écoule le torrent du Creugenat, spectaculaire déversoir occasionnel. Ce cours d'eau reçoit d'autres émergences et petits déversoirs. Quasiment chaque année, l'ensemble atteint des débits de 10 m^3/s et plus qui s'ajoutent aux 1,5 à 2 m^3/s de la résurgence de la Beuchire. Dans le langage local (ainsi que sur le cartes nationales suisses), le déversoir occasionnel porte le même nom que l'estavelle.

En outre, la vallée sèche principale présente des remontées des eaux souterraines (RES, zones pointillées sur la figure 3) diffusant sur de nombreuses surfaces. Les puits, les dolines comblées, la suppression de déversoirs occasionnels, la construction de tunnels et d'un viaduc monumental, ainsi que d'autres actions réalisées ou en projet dans ce secteur, constituent une passionnante expérience hydrologique et géomorphologique.

5. Conclusion

Cette notice démontre l'existence d'importants réseaux de vallées sèches et en esquisse les caractéristiques principales et leur intérêt, en particulier celui des déversoirs occasionnels en milieu karstique. Dans la région analysée, 6 stades d'évolution de vallées sèches ont pu être distingués et constituent un paysage karstique varié, précieux, voire original. Dans le contexte du développement durable, la conservation et la compréhension des vallées sèches devraient faire l'objet d'une attention spécifique, particulièrement pour les sites les plus sensibles. Un inventaire exhaustif s'impose, distinguant notamment les aspects conservations et valorisation (ou développement).

Il serait en particulier souhaitable d'assurer un certain suivi des déversoirs occasionnels (connaissance des débits de crue, mise en évidence d'érosions excessives ou de charriages inhabituels de matériaux, etc.). Ces connaissances pourront alors être mises en relation avec des interventions anthropiques ou simplement permettre de mieux caractériser le fonctionnement hydrographique régional. Dans certains cas particuliers, il est techniquement envisageable de transformer le cours d'eau temporaire d'un déversoir occasionnel en un ruisseau pérenne. Une expérience de ce type est d'ailleurs en fonction depuis plus de 15 ans à Porrentruy, dans le secteur aval du système de l'Ajoulote.

6. Remarques concernant les cartes

Sur les cartes (figures 1 à 3) ne sont représentées que :

- Les sources karstiques et résurgences avec des débits supérieurs à 20 l/s en basses eaux.
- Les ruisselets et rus avec des débits supérieurs à 1 l/s en basses eaux.

Les « déversoirs occasionnels » sont définis en détail par Bouvier (1984) à l'occasion de la publication d'un premier inventaire. Il convient de distinguer les déversoirs occasionnels représentés par des successions de triangles verts,

des sections de cours d'eau asséchées en basses eaux, qui sont représentés par des successions de triangles bleus.

Les RES sont définis comme étant des zones humides temporaires, qui ne sont pas liées au débordement de cours d'eau de surface, mais à des zones de remontées d'eaux souterraines (Bouvier 1984). Les RES peuvent être formés d'aquifères poreux, mais aussi parcours comblés d'anciens cours d'eau, canaux, drainages, ou liés à d'autres actions anthropiques. Le concept de RES a été appliqué dans le plan sectoriel définissant les zones sensibles aux phénomènes naturels du Plan directeur cantonal du canton du Jura. L'inventaire des RES est incomplet sur la partie française du territoire. Les RES représentent des surfaces de 20 ha entre St-Ursanne et La Motte le long du Doubs (figure 2), de 10 ha dans le secteur de l'Allaine et de 15 ha dans le bassin versant du Creugenat.

Remerciements

L'auteur remercie amicalement les personnes suivantes pour les informations diverses inédites qu'elles nous ont transmises : G. Della Valle (OEHE, ct Berne), F. Flury et MFR à Delémont, B. Jacquat (OEPN, ct Jura), C. Juillerat, M. Monbaron, B. Schindler, P. Vergon et D. Cailhol (GSAM, Mandeure), P.X. Meury et Spéléoclub Jura, G. Domon, P. Moesch, B. Narbey, A. Seidler, A. Triboulet. Il remercie également P.-Y. Jeannin (ISSKA) pour son soutien dans la rédaction de cet article et S. Rotzer (ISSKA) pour la mise en forme des figures.

Cartes

Traçages en Franche-Comté (1987) Annales scientifiques de l'Université de Besançon, géologie, Mémoire N°2.

Cartes géologiques de France : BRGN (1:50000) : Delle 475 (1985), Damprichard 505 (1965).

France : IGN (1:25000) : Montbéliard 3522 Est, Delle 3622 Ouest, Damprichard 3622.

Suisse : OFT (1:25000) : Damvant 1084, Saint-Ursanne 1085, Bellelay 1105.

Bibliographie

Bouvier J.-C. (1984). Aspects quantitatifs de la protection des eaux dans le canton du Jura, *Actes de la Société jurassienne d'Emulation, Porrentruy, année 1984, 1-16 (y.c. carte 1:100'000).*

Bouvier J.-C. (1997). La boucle helvético-française du Doubs, *Bull. Soc. d'Hist. nat. Musée du Château de Montbéliard, année 1997, 167-186.*

Bouvier J.-C. (2001). Commentaires sur le bassin karstique de Gland, *Bull. Soc. d'Hist. nat. Musée du Château de Montbéliard, année 2001, 283-288.*

Boyer L., Grandgirard V. (1992). *Evaluation des vallées sèches de l'Ajoie*, Mémoire de diplôme, Institut de Géographie, Université de Fribourg.

Comité Départemental de Spéléologie du Doubs (1966). *Inventaire spéléologique du Doubs, tome 3*. 550 p. Groupement pour l'Inventaire, la Protection et l'Étude du Karst du Massif Jurassien.

Comité Départemental de Spéléologie du Doubs (2004). *Inventaire spéléologique du Doubs, tome 4*. 491 p. Groupement pour l'Inventaire, la Protection et l'Étude du Karst du Massif Jurassien.

Fierz S., Monbaron M. (1999). Morphogénèse des Franches-Montagnes, *Eclogae Helv. 92, 199-210.*

Gigon R., Wenger R. (1986). *Inventaire spéléologique de la Suisse II. Canton du Jura.* 292 p. Commission de Spéléologie de la Soc. helv. des Sciences naturelles.

Grétillat P.A. (1998). *Aquifères karstiques et poreux de l'Ajoie*, Thèse, Inst. géol. de l'Université de Neuchâtel, 208 p. + annexes + carte 1:25000.

Kohler V., Flury F., Grobet D., Hessenauer M. (2001) : Projet de viaducs A16 à proximité de l'estavelle du Creugenat et de la rivière souterraine l'Ajoulote : caractérisation hydrogéologique et impacts, *Bull. géol. Appliquée, vol. 6, N°2, 109-225.*

Monbaron M., Bouvier J.-C. (1999). L'estavelle du Creugenat : chroniques des crues et dispositif moderne d'observation, in : *Karst 99,* Spelunca Mémoire, Devenson, allée des Pins, F-13009 Marseille, 145-150.

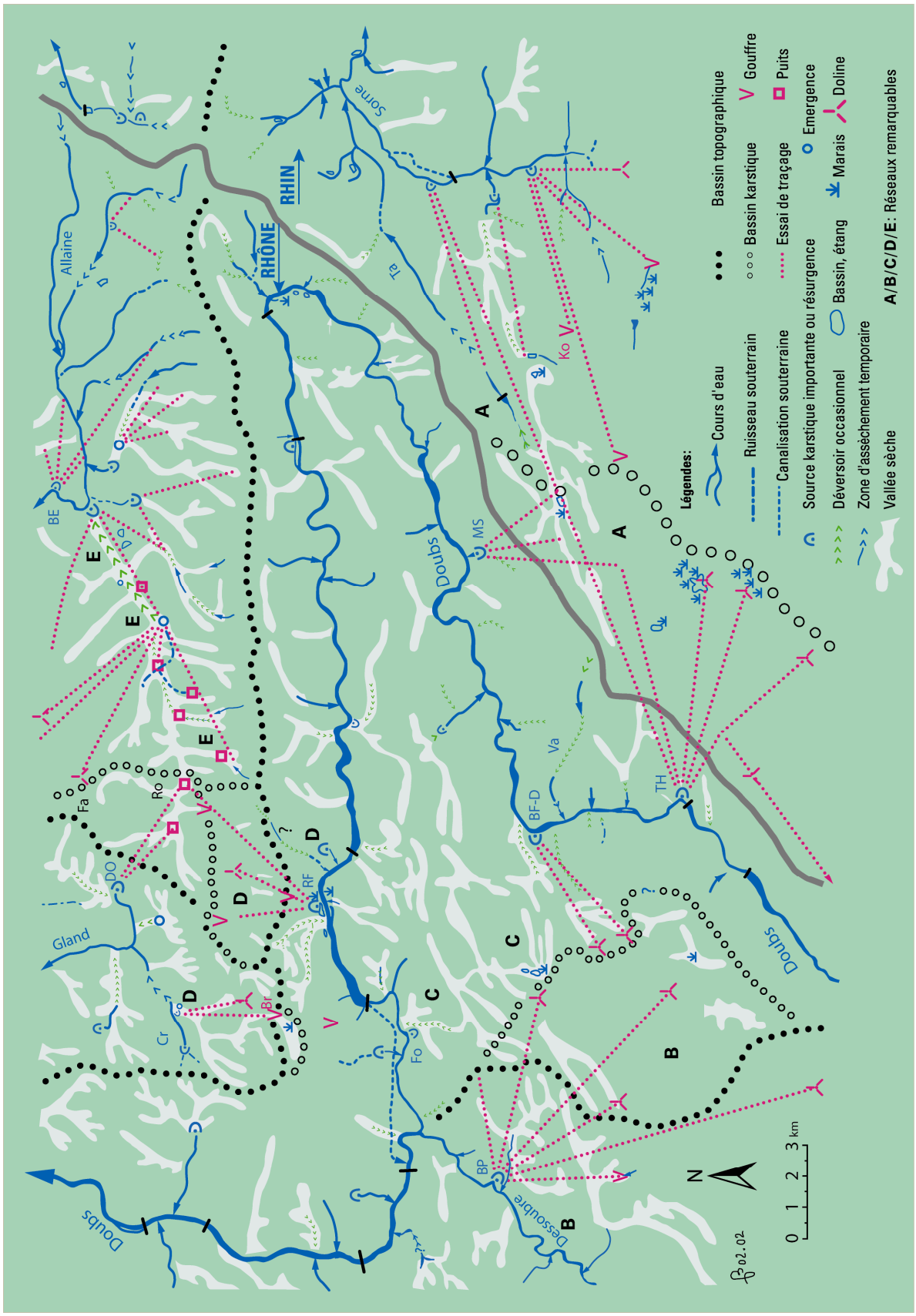


Figure 1 : Hydrographie et géomorphologie de la région karstique du Doubs-Franco-suisse.

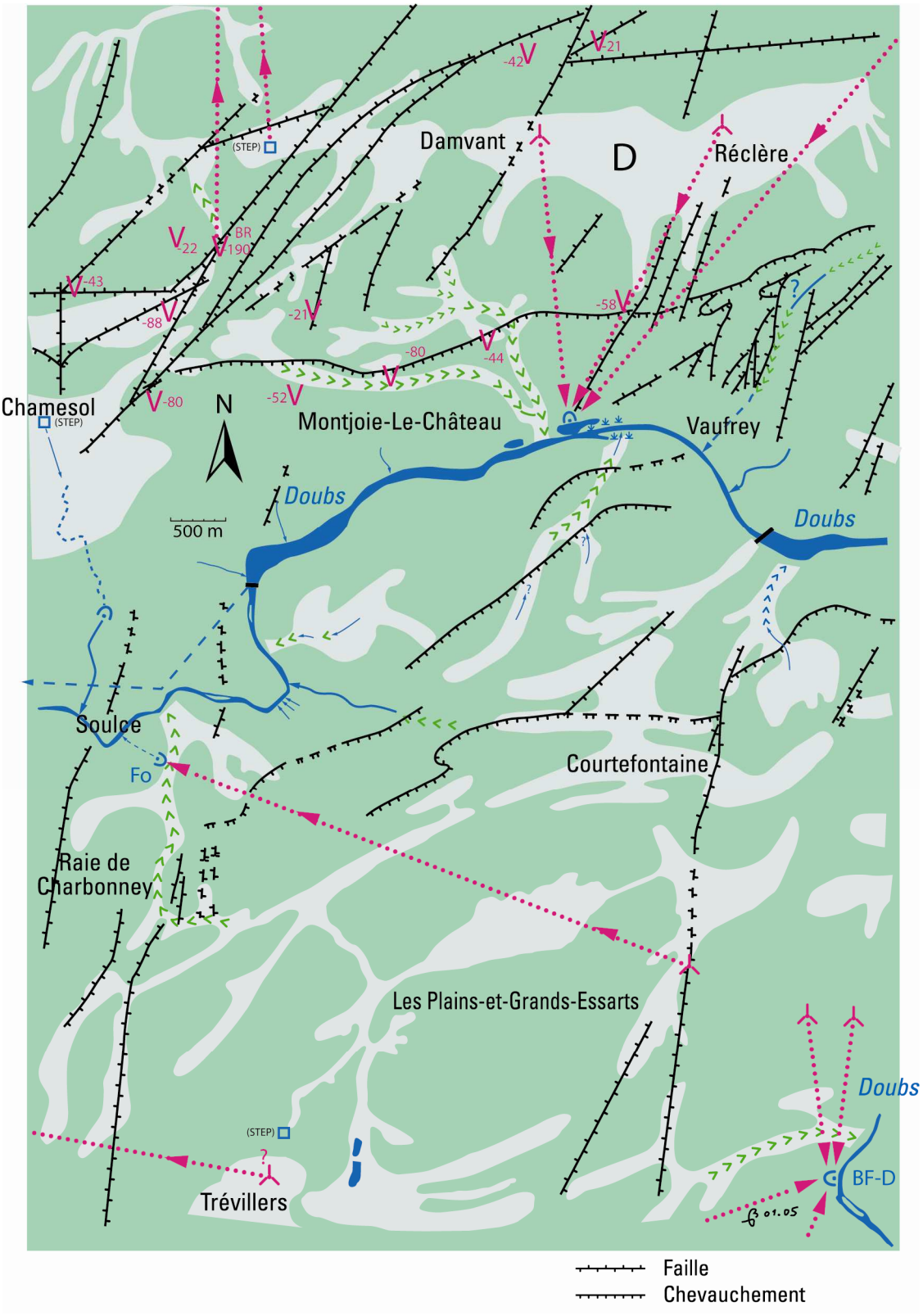


Figure 2 : Géomorphologie à travers la Vallée du Doubs : de Trévillers (Doubs, France) à Réclère (Jura, Suisse).

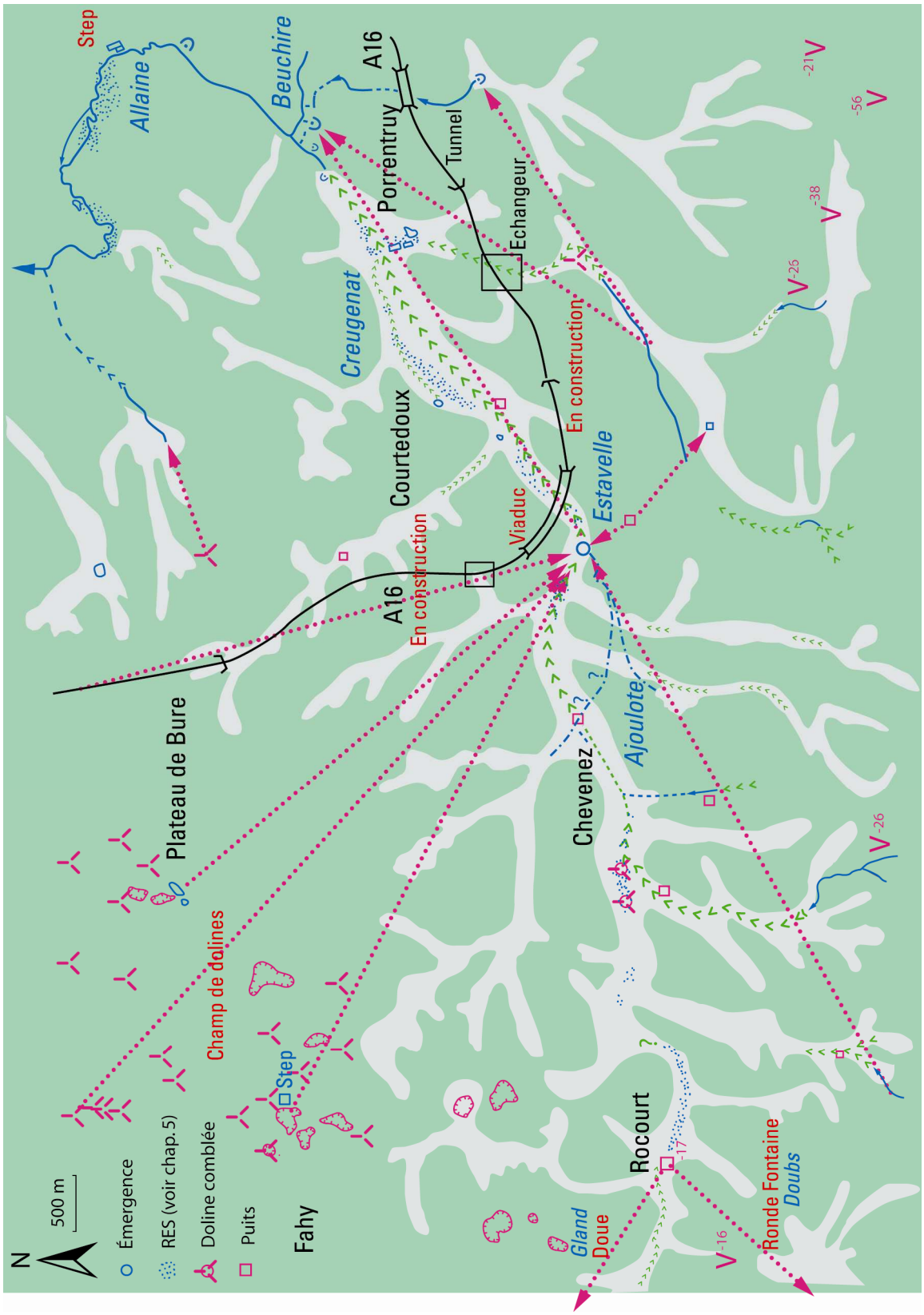


Figure 3 : Bassin karstique de l'Ajoulote, affluent de l'Allaine, qui reçoit la Bourbeuse sur le Territoire de Belfort pour former l'Allan aboutissant au Doubs, à l'ouest de Montbéliard. (cf aussi figure 1, E)