

La problématique du karst lors du creusement d'un tunnel

Autor(en): **Jeannin, P.-Y.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin für angewandte Geologie**

Band (Jahr): **12 (2007)**

Heft 2

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-226377>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

La problématique du karst lors du creusement d'un tunnel

P.-Y. Jeannin¹

Mots-clés: karst, génie civil, eaux souterraines, conduits karstiques, genèse du karst, prévision

Résumé

Après une introduction décrivant les problèmes de génie civil en milieu karstique, cet article présente un aperçu des caractéristiques principales de ce milieu. Un bref aperçu des formes karstiques typiques (dolines, ouvalas, lapiés, etc.) est suivi d'un petit chapitre résumant les particularités hydrologiques des massifs karstiques: 1) épikarst stockant et répartissant les infiltrations entre un écoulement rapide (conduits) et lent (volumes de roche fissurés et peu perméables); 2) zone non saturée atteignant souvent plusieurs centaines de mètres d'épaisseur; 3) zone épinoyée présentant des mises en charge de plusieurs centaines de mètres et 4) zone noyée renfermant un volume d'eau parfois considérable.

Suit un chapitre sur la genèse et l'âge des formes karstiques, en particulier des conduits souterrains (grottes). La relation avec les gradients hydrauliques et la possibilité de développer des conduits en quelques centaines, voire dizaines d'années lorsque les gradients sont élevés (à proximité de tunnels ou de barrages) y est relevée.

La deuxième partie de l'article présente les recherches en cours pour prévoir la position des conduits karstiques dans les massifs, ce qui est particulièrement intéressant lors du creusement de tunnels. Il apparaît que les conduits se développent préférentiellement le long d'horizons géologiques particuliers (horizons d'inception) que l'on doit pouvoir reconnaître sur le terrain. La prévision de la position des conduits karstiques s'en trouve nettement améliorée.

Abstract

After a short introduction giving a list of typical civil engineering problems related to karst, this paper presents an overview of karst main characteristics. A summary of typical karst landforms (dolines, uvalas, karrenfields, etc.) is followed by a short chapter on hydrological peculiarities. Those are: 1) epikarst with a simultaneous storage and distribution of infiltration between quick flow (conduits) and slow flow (low permeability volumes of fissured rock); 2) unsaturated zone often as thick as several hundreds of metres; 3) epiphreatic zone where flooding height can reach several hundreds of metres; 4) phreatic zone enclosing sometime large storage volumes.

A chapter on cave genesis and age follows. The relation between hydraulic gradients and the rate of increase in conduit size is mentioned, explaining that conduits may develop as quick as within some hundreds or even dozens of years if gradients are high (as around tunnels or dams).

The second part of the paper presents ongoing research on the prediction of the position of karst conduits. Those appear to occur mainly along some special geological horizons, called «inception horizons», which may be recognized in the field. The prediction of conduit position can therefore be highly improved, what can be very useful for tunnelling.

¹ Institut Suisse de spéléologie et de karstologie, case postale 818, 2301 La Chaux-de-Fonds, Suisse

Nach einem Vortrag, gehalten an der 17. Bodenseetagung zum Thema «Karst im Untertagebau», St. Gallen, Oktober 2006.

1. Introduction

Tout géologue a déjà entendu parlé de karst. Ce thème n'est cependant pas développé dans les hautes écoles, laissant aux étudiants l'idée d'une discipline «académico-touristique» plutôt que d'une discipline des sciences de la Terre à part entière.

Dans la pratique, c'est bien souvent lorsque des problèmes concrets se posent pour la construction d'un tunnel, d'un barrage ou d'un pont que les géologues praticiens commencent à s'y intéresser... C'est donc «sur le tas» qu'il faut apprendre, sans nécessairement disposer d'ouvrages de référence et sans connaître l'état de la recherche académique dans ce domaine.

Le présent article peut paraître un peu théorique, mais il apporte les éléments de base

de la karstologie, trop souvent ignorés, qui permettent aux géologues praticiens d'appréhender le karst en tenant compte de ses spécificités principales. La deuxième partie de l'article est plus proche de la pratique. Elle esquisse le contenu d'un projet qui devrait permettre dans les années à venir de prédire les occurrences de ces phénomènes, en particulier dans les tunnels.

2. Problèmes pour le génie civil

La figure 1 résume les principaux problèmes rencontrés lors du percement d'un tunnel en milieu karstique. La plupart de ces problèmes peuvent se retrouver dans d'autres activités de la géologie de l'ingénieur.

Le problème karstique doit être pris très au

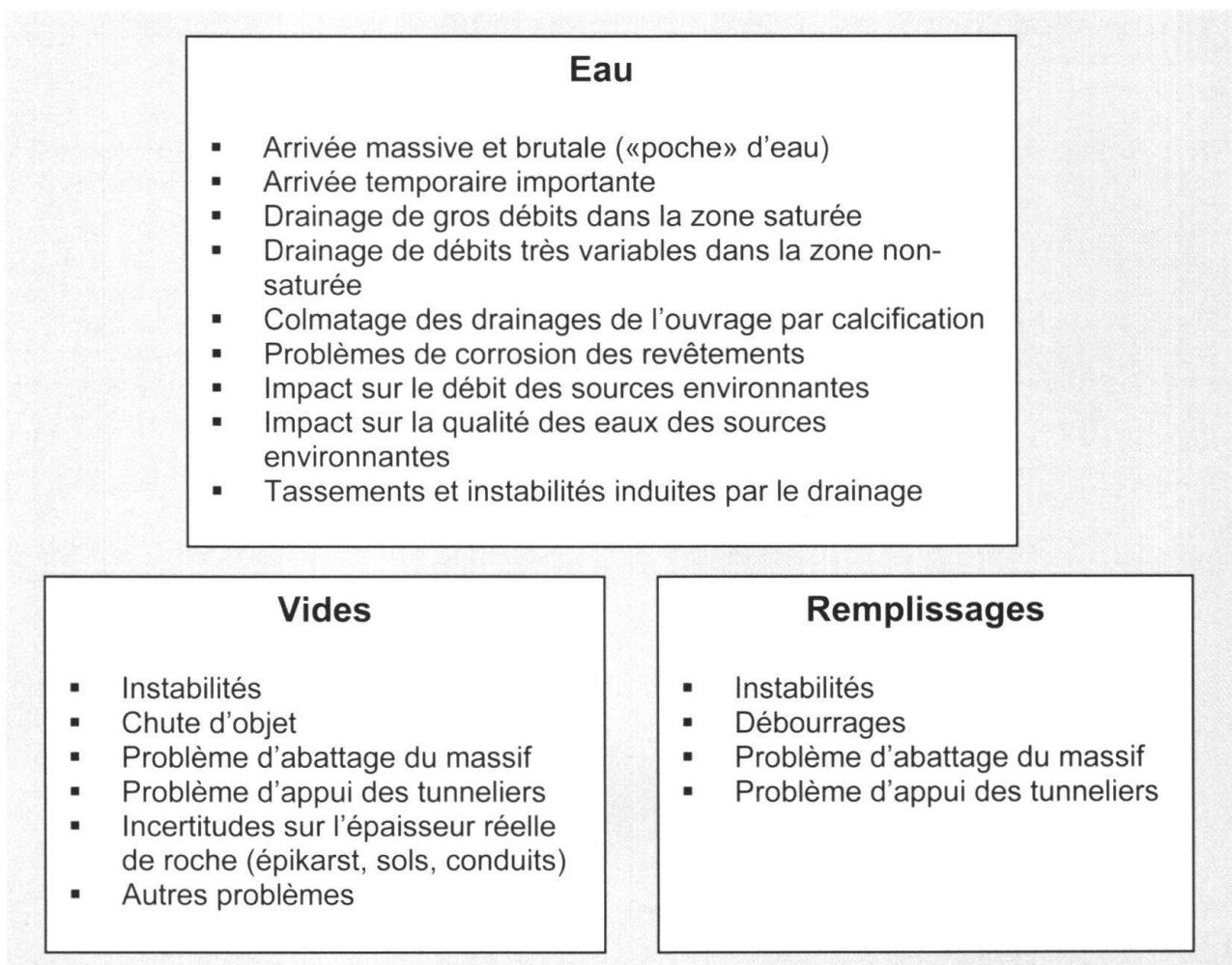


Fig. 1: Problèmes principaux rencontrés lors du percement de tunnels en milieu karstique.

sérieux, car il peut arriver qu'il soit tel que le projet de tunnel doive être retardé de plusieurs décennies (p. ex. Twann) ou que des dommages importants et irréversibles à des sources alentours soient occasionnés (Mont d'Or, Flims).

Pour les chantiers, la rencontre de phénomènes karstiques est presque toujours problématique et susceptible de conduire à des retards et à des surcoûts conséquents.

Le tableau 1 donne un aperçu de quelques cas «célèbres» rencontrés en Suisse. Les normes et recommandations en vigueur sont relativement laconiques par rapport aux problèmes karstiques. Elles suggèrent d'y prendre garde, mais ne donnent aucune indication précise sur la manière de prévoir ou de gérer les occurrences de karst. De plus, cette matière étant relativement peu abordée dans les hautes écoles, les géologues et ingénieurs doivent se former par eux-mêmes lorsqu'ils sont confrontés aux cas problématiques.

3. Le karst

3.1 Particularités morphologiques

Le mot karst est dérivé du nom d'une région de Slovénie où les phénomènes karstiques ont été décrits et classifiés par Cvijic au début du 20^{ème} siècle. Ses articles ont pour

la suite été repris par d'autres scientifiques, établissant ainsi le mot karst dans le langage scientifique. La figure 2 présente les principaux éléments de ces paysages façonnés par la dissolution de la roche – en général des calcaires ou des dolomies – dans les eaux météoriques. Le gypse et le sel sont généralement aussi karstifiés. Ces deux derniers types de roches présentent cependant des particularités qui ne seront pas développées dans le présent aperçu.

Les éléments des paysages karstiques les plus visibles dans nos régions sont les dolines, les lapiés, l'absence de ruisseaux ou de rivières en surface au-delà de quelques vallées principales, la présence de poljés (vallées fermées), de gouffres, de grottes, de pertes de cours d'eau.

Ces formes superficielles ont des prolongations souterraines, peu visibles, que sont les réseaux de conduits karstiques. En karstologie, un conduit est un tube ou une fissure dont l'ouverture dépasse 1 cm. Ces conduits sont toujours organisés en réseaux connexes formant de véritables labyrinthes tridimensionnels. Les plus gros conduits peuvent être parcourus et cartographiés par les spéléologues, ce qui rend leur représentation possible grâce aux ordinateurs (figure 3). Naturellement, l'effet tridimensionnel est plus spectaculaire sur l'écran d'un ordinateur lorsque l'image bouge et que l'on vole à travers les dédales de galeries. Dans le plu-

• Tunnel du Mont-d'Or (VD)	Arrivée massive et abrupte d'eau, assèchement d'une source.
• Tunnel de Grenchen (SO)	Influence majeure sur une source captée qui alimente une commune.
• Tunnel de la Vue-des-Alpes (NE)	Construction d'un pont dans le tunnel pour franchir un vide karstique.
• Tunnel de Sauges (NE)	Arrivée massive et abrupte d'eau issue d'une grotte. Ennoyement de diverses machines.
• Tunnel d'Engelberg (OW)	Arrivée massive et abrupte d'eau issue d'une grotte. Débris-flow dans le tunnel.
• Tunnel de Flims (GR)	Baisse d'une source utilisée pour la production hydroélectrique; compensation Fr. 3'750'000.-
• Tunnel de Twann (BE)	Recoupement de plusieurs conduits aquifères, impliquant l'abandon du tunnel.

Tab. 1:

Problèmes liés au karst rencontrés dans quelques tunnels de Suisse. La liste n'est pas exhaustive.

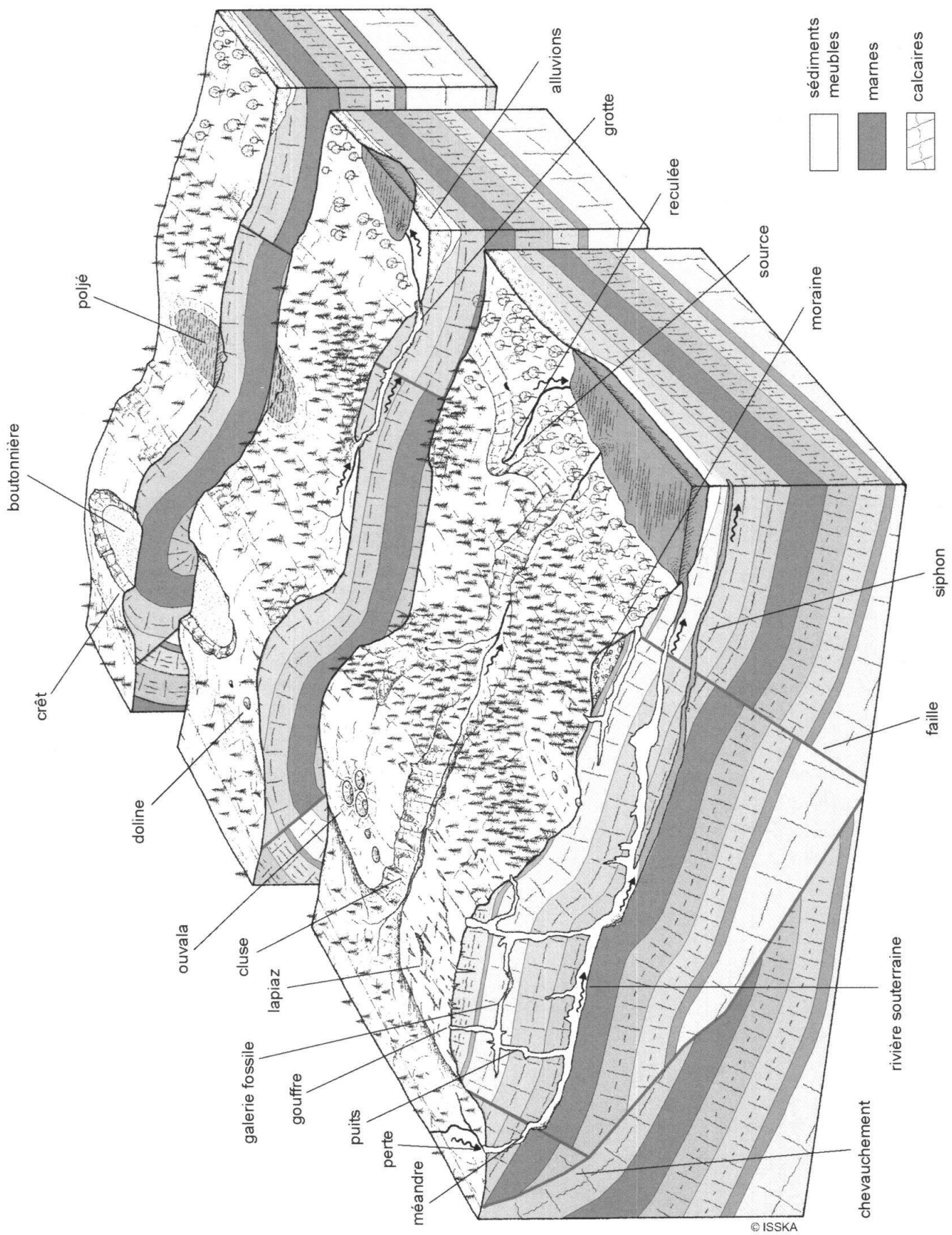


Fig. 2: Bloc diagramme présentant les principaux phénomènes karstiques.

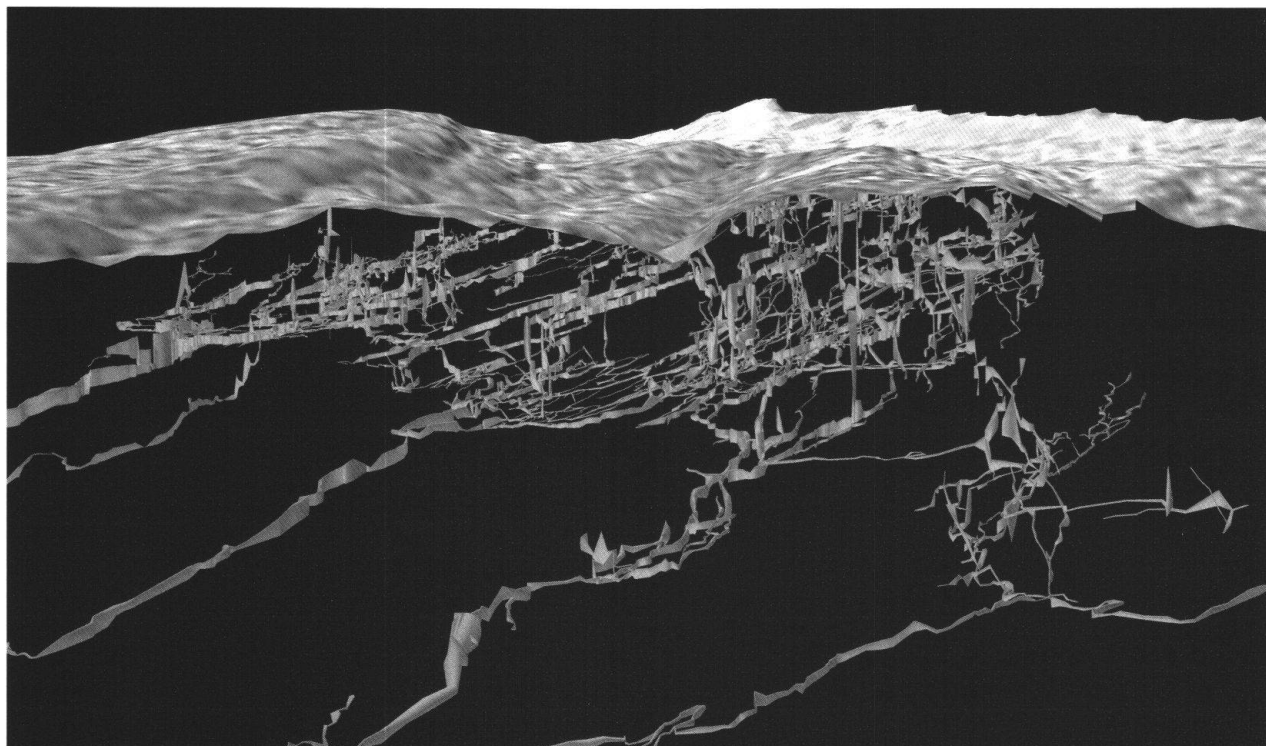


Fig. 3: Vue 3D du réseau spéléologique des Siebenhengste (Suisse).

part des cas, le volume de ces conduits est faible en comparaison du volume total des calcaires. La probabilité de recouper un conduit avec un forage ne dépasse guère quelques pour-cents.

3.2 Particularités hydrologiques

La présence de conduits karstiques confère à ce milieu une particularité qui conditionne fortement l'écoulement des eaux souterraines. La description qui suit en esquisse les caractéristiques principales.

Dans certains cas, les eaux météoriques rencontrent des surfaces de calcaires dénudés, généralement lapiazées, où les nombreuses fissures absorbent rapidement les eaux (figure 4, trait fort à la surface du terrain). Dans d'autres cas, les calcaires sont couverts de sols ou de terrains meubles qui retiennent quelque peu les eaux avant leur infiltration (figure 4, trait pointillé à la surface du terrain). La surface des calcaires est cependant toujours plus ou moins altérée, formant une couche de quelques mètres d'épaisseur capable d'absorber l'essentiel des

eaux d'infiltrations. Cette couche est appelée épikarst. La base de cette couche peut stocker une bonne partie des infiltrations en formant une nappe perchée, capable d'alimenter les petites fissures des calcaires sous-jacents pendant des semaines, voire des mois. La partie supérieure de l'épikarst est très perméable et, en cas de forte pluie, elle draine les eaux d'infiltration en direction des principaux conduits karstiques, verticaux, qui traversent la zone non saturée du karst (ovales sur figure 4). L'épikarst peut donc à la fois conduire rapidement une partie des eaux des précipitations dans le réseau de conduits karstiques (couche supérieure de l'épikarst) et une autre partie vers des réservoirs et écoulements beaucoup plus lents (base de l'épikarst).

Dans certaines situations, il peut arriver qu'un ruisseau, voire une rivière se forme sur des terrains non karstiques et se perde alors qu'elle atteint les calcaires. Dans ce type de situation, l'eau ne transite pas à travers l'épikarst, mais s'infiltré directement dans des conduits verticaux de la zone non saturée.

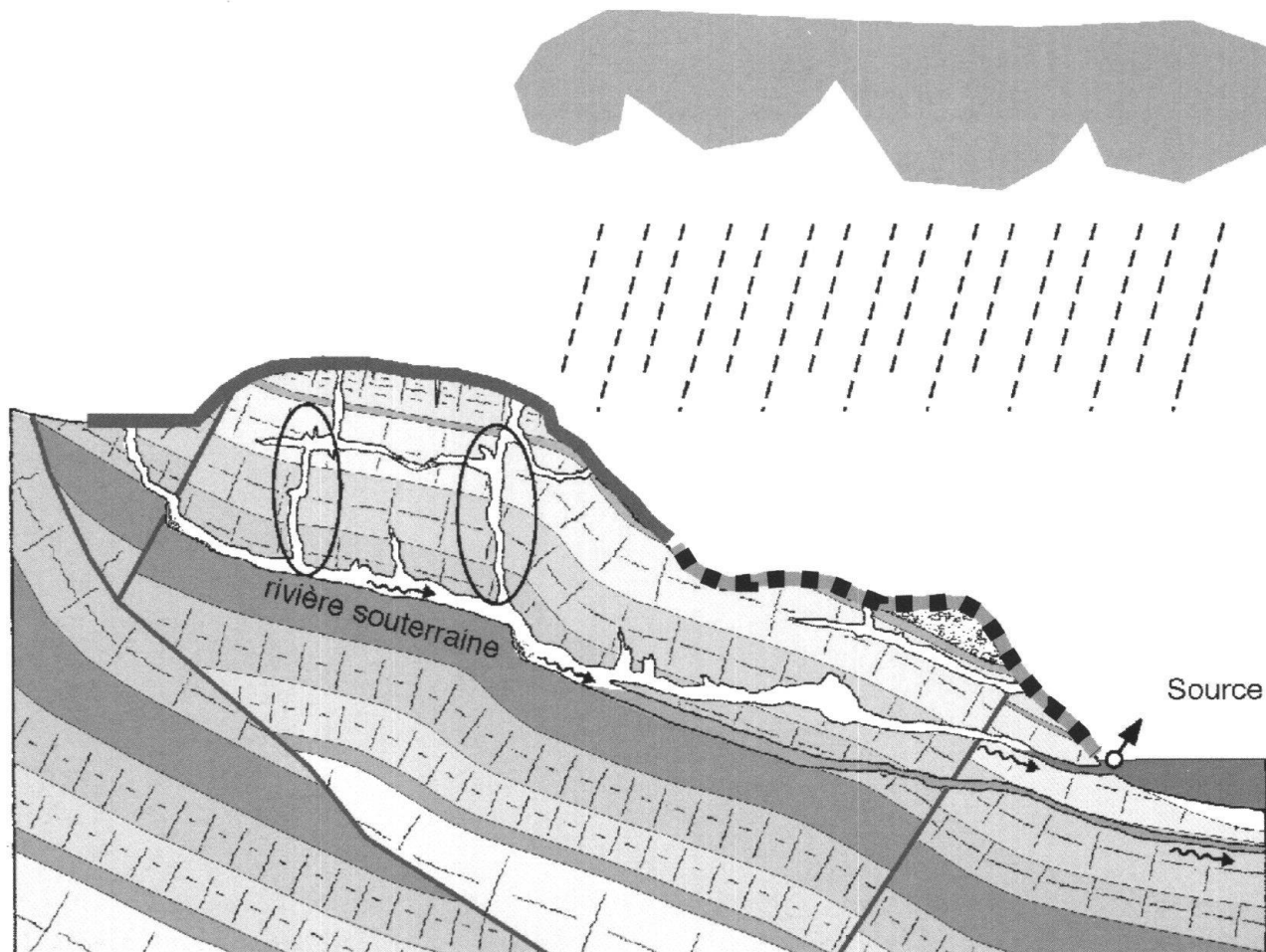


Fig. 4: Profil décrivant le fonctionnement hydrogéologique du milieu karstique. En gris à la surface du terrain: lapiaz dénudées; en gris pointillé: zone couverte d'humus; ovales: zone non saturée du karst.

La zone non saturée du karst est caractérisée par des zones de puits verticaux séparés par de courtes galeries. Son épaisseur dépasse très fréquemment 100 mètres et atteint 1000, voire 2000 mètres.

A partir d'une certaine profondeur, les eaux peuvent atteindre la base de la série calcaire et suivent alors le plongement des couches sous-jacentes, non karstifiées, donc en principe assez imperméables. Si la base des calcaires est située sous le niveau de l'exutoire du système, les eaux de la zone non saturée arrivent directement dans la zone noyée (ou phréatique) du karst.

En conditions de basses eaux, la zone noyée est pratiquement horizontale, située au niveau de l'exutoire du système. En hautes eaux, le drainage de la zone non saturée étant assez efficace, des quantités importantes d'eau atteignent rapidement la zone

noyée, à tel point que les conduits menant à l'exutoire peinent à évacuer les eaux: le système se met en charge. Des mises en charge de 10 à 100 mètres sont normales, elles peuvent atteindre 300 voire 500 mètres dans les cas extrêmes. Ces mises en charge durent habituellement quelques heures à quelques jours. Les ouvrages souterrains situés dans cette zone apparaissent secs 300, voire 350 jours par an et peuvent être envahis de plusieurs centaines de l/s lors de fortes crues. Tout à l'aval du système souterrain, les conduits sont le plus souvent noyés. Ils mènent les eaux à l'exutoire du système: la source karstique. Celle-ci peut présenter plusieurs points de sortie dont généralement un seul est pérenne. Le débit des systèmes karstiques (débit total des tous les exutoires d'une même système) est de l'ordre de quelques l/s pour les petits systèmes

en étiage, et jusqu'à 80 m³/s lors de crues pour les plus grosses sources connues en Suisse (source de l'Orbe). Ils sont caractérisés par une forte variabilité de débit (le débit de crue est facilement 20 à 200 fois plus élevé que le débit d'étiage). Attention toutefois, un exutoire, bien que karstique, peut présenter un débit très stable!

En conclusion de cet aperçu des écoulements souterrains en milieu karstique, il convient de mentionner l'extrême prudence à avoir lors de l'interprétation de données piézométriques en milieu karstique. Bien souvent, le niveau d'eau dans un forage est sans rapport direct avec les charge hydrauliques réelles dans l'aquifère. Deux forages voisins de quelques mètres peuvent donner des écarts de plusieurs dizaines de mètres, c'est normal! Je renvoie le lecteur à Jeannin (1995) pour plus d'information à ce sujet. En outre, il est généralement inutile de mesurer des niveaux d'eau à intervalles réguliers (p. ex. une fois par mois). Il est préférable de mesurer quelques fois en basses eaux et de suivre une ou deux crues de manière détaillée. L'installation de sondes de pression est recommandée.

3.3 Comment se forme le karst?

La dissolution

Les calcaires représentent la majorité des roches karstifiées de la Planète. Cette roche, ou plus précisément les cristaux de calcite qui la constitue, est soluble dans les eaux de pluie. En laboratoire, sa solubilité est de l'ordre de 50 mg/l. En admettant une pluie annuelle de 1000 mm (1000 l/m²), la couche de calcaire potentiellement dissoute est de l'ordre de 0.01 mm/an. Ceci peut paraître relativement peu, mais représente tout de même une dizaine de mètres par million d'années.

Dans la nature, les conditions ne sont cependant pas celles des laboratoires. En effet, la présence d'un sol (terre végétale) à la surface des calcaires peut induire une augmentation notable de la solubilité. En raison de la

respiration des plantes par leurs racines et de celle des micro-organismes, le sol est largement enrichi en CO₂. Les teneurs y sont typiquement 100 fois plus élevées que dans l'atmosphère, rendant l'eau acide et plus agressive. Avec un sol, la solubilité des calcaires atteint facilement 200 à 400 mg/l.

En circulant sur (ou dans) les calcaires, l'eau dissout la roche et atteint rapidement une concentration proche de la saturation en calcite dissoute. Pendant longtemps les scientifiques se sont demandés comment les grottes pouvaient se former alors que l'eau semble saturée après quelques mètres de contact avec les calcaires. Ce n'est que dans les années 80 du siècle passé que des expériences de laboratoire très détaillées ont permis de montrer que la vitesse de dissolution diminue très fortement à partir d'environ 90 % de saturation. Ainsi, les eaux de pluie peuvent traverser un massif calcaire entier sans avoir atteint la saturation, en d'autres termes, en restant agressives. L'essentiel du calcaire est donc dissous en surface et dans la zone où l'eau s'infiltré, puis, la quantité de calcaire dissous devient très faible, mais presque constante tout au long du cheminement souterrain.

La dolomie (CaMg(CO₃)₂) est moins soluble que les calcaires, mais néanmoins fréquemment karstifiée.

Naissance d'un système karstique

La figure 5 résume le principe général de la karstification. Dès leur émergence hors des eaux marines, les roches calcaires (ou autres roches solubles) 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'infiltré dans les rares et étroites fissures présentes, et l'essentiel de l'eau s'écoule en surface, emportant quelques centimètres de calcaire par millénaire.

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'infiltré 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 positive). 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.

Le processus de la karstification est contrôlé par la combinaison de plusieurs facteurs: géométrie initiale des pores, qualité et quantité des eaux d'infiltration, position de la zone d'infiltration et des exutoires, nature de la roche et discontinuités des couches calcaires.

Au cours de ce phénomène, il est important de noter que les charges hydrauliques varient notablement (figure 6). Dans un premier temps, elles sont relativement homogènes dans la masse de calcaire fissuré. Tous les cheminements initiaux s'élargissent plus ou moins parallèlement. Leur diamètre s'amenuise d'amont en aval. Dès l'instant où un cheminement parvient à traverser le massif calcaire avec un conduit d'un diamètre supérieur à 1 cm (apparition d'écoulements turbulents), un saut brutal s'opère dans les charges hydrauliques et dans le flux transitant par ce conduit. Le conduit devient le drain principal du massif et attire les autres cheminements vers lui, créant un véritable réseau de drainage hiérarchisé. L'évolution des conduits est alors très rapide permet-

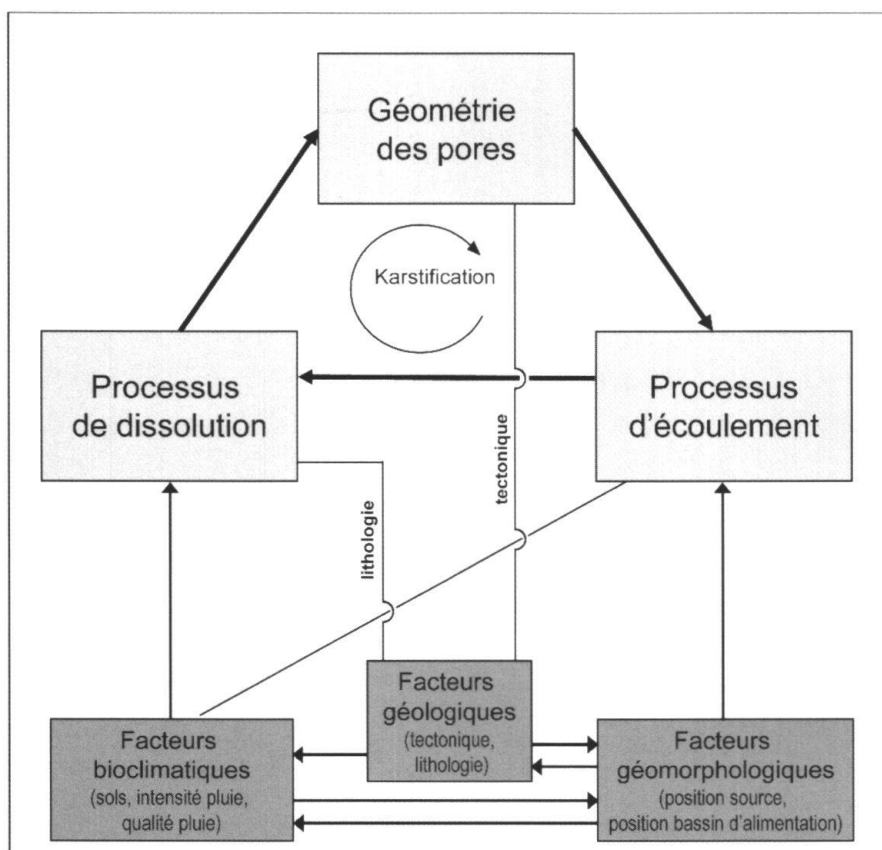


Fig. 5: Schéma de principe de la karstification. Il ressort de cette figure que la karstification est un processus qui s'autoaccélère.

tant à un véritable réseau de drainage, dont la taille des drains augmente d'amont en aval, de se former.

Ce processus prend quelques milliers d'années en conditions naturelles, mais peut être beaucoup plus rapide (quelques siècles, voire quelques dizaines d'années) lorsque les gradients hydrauliques sont très élevés, comme c'est souvent le cas à proximité de tunnels drainants ou de barrages.

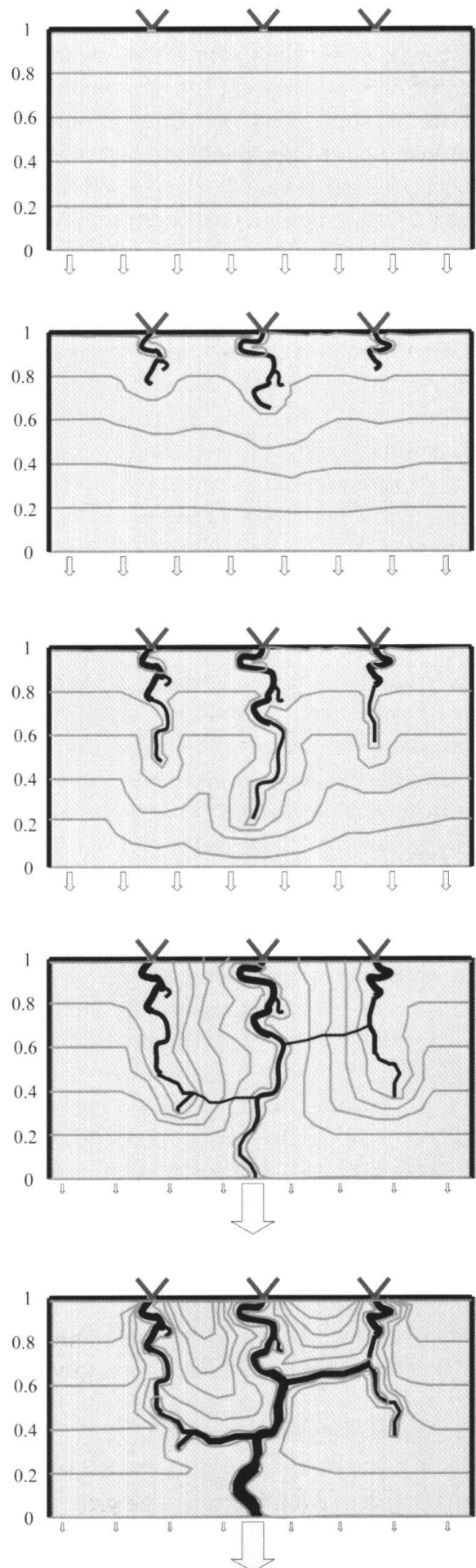
Maturité

Après un certain temps, les galeries sont suffisamment grandes pour absorber la totalité de l'eau disponible, à l'exception des périodes de fortes crues. La vitesse d'écoulement diminue donc dans les galeries, réduisant la vitesse de dissolution du calcaire. En basses eaux, l'eau circule même si lentement que les fines particules d'argiles en suspension se déposent sur les parois, les protégeant de la dissolution. Pendant les crues, l'eau parvient parfois à arracher la couche d'argile et à dissoudre quelque peu le calcaire. Le réseau karstique a donc atteint sa maturité, puisqu'un équilibre s'installe entre le remplissage des galeries (en basses eaux) et leur agrandissement par érosion du sédiment et dissolution du calcaire (en hautes eaux).

Fossilisation et disparition des cavernes

Un réseau mature peut rester en équilibre pendant plusieurs dizaines de milliers d'années, voire davantage. Pour rompre cet équilibre, des conditions extérieures au système doivent varier.

Fig. 6: Principe schématique de l'évolution de la karstification et des charges hydrauliques. Les charges, d'abord homogènes (a), se déforment autour des conduits karstiques (b, c). Dès qu'un conduit traverse le système, la charge y diminue brusquement et il devient drainant pour les conduits voisins (d). A partir de ce stade, le débit total à travers le système augmente très fortement. Le réseau de drainage karstique est né.



Le cas le plus fréquent est l'abaissement du niveau de base, c'est-à-dire de la source du système, en réponse à l'érosion des vallées environnantes. Un nouveau réseau de conduits va donc se développer en relation avec cette nouvelle source et les galeries formées précédemment s'assècheront d'abord temporairement, puis durablement: les galeries deviennent fossiles. La grande majorité des grottes que les spéléologues visitent sont en fait des galeries fossiles, délaissées par les eaux au profit de conduits situés plus profondément dans les massifs calcaires. Les galeries fossiles peuvent rester presque sans évoluer pendant des millions d'années. Des concrétions (stalagmites, stalactites, etc.) peuvent apparaître et éventuellement les combler. Parfois la voûte ou les parois s'effondrent remplissant peu à peu le vide de blocs. Parallèlement, l'érosion et la dissolution des calcaires en surface attaque les massifs calcaires qui finissent par s'aplanir complètement, faisant disparaître au passage les grottes qu'ils contiennent. Ce processus nécessite cependant généralement dizaines de millions d'années.

Dans certaines situations, le niveau de base régional remonte. Les vallées alpines étaient par exemple remplies de glace sur plusieurs centaines de mètres pendant les périodes glaciaires. Les eaux souterraines sont alors contraintes à remonter également, noyant plusieurs générations de galeries formées antérieurement. Les apports en particules étant élevés et les vitesses d'écoulement dans les galeries relativement faibles, de grandes masses de sédiments se sont accumulées dans les galeries pendant ces périodes. Nombre de galeries sont alors complètement comblées de sédiment et deviennent inaccessibles. Seuls quelques chemineaux principaux restent actifs et ouverts.

3.4 L'âge des cavernes

En observant attentivement une grotte et ce qu'elle contient, il est assez facile d'en reconstituer la succession des événements.

C'est ce qu'on appelle la chronologie relative. Il est naturellement intéressant de pouvoir donner un âge absolu à chacun des événements identifiés dans la chronologie relative. Il existe de nos jours différentes méthodes permettant de dater les sédiments des grottes. Les plus connues sont les méthodes radiométriques dont la plus courante est la méthode au ^{14}C . Cette méthode est utilisable pour dater des éléments organiques (p. ex. des os) trouvés dans des grottes. Elle ne permet cependant pas de dater des objets plus anciens que 40 à 50'000 ans, ce qui est peu comparé à l'histoire de la plupart des grottes. Une méthode similaire, utilisant le rapport entre les isotopes de Thorium (^{230}Th) et d'Uranium (^{234}U) permet de dater des concrétions jusqu'à 350'000, voire 600'000 ans. Récemment, la mesure de traces d'isotopes d'aluminium (^{26}Al) et de Beryllium (^{10}Be) dans des grains de quartz des sédiments des cavernes a permis de dater des galeries vieilles de plus de 4 millions d'années dans les Alpes Suisses (Häuselmann et al. 2007).

4. Comment prévoir les occurrences de karst?

Les éléments théoriques de la genèse du karst nous permettent d'identifier deux facteurs principaux contrôlant la géométrie, donc la position des conduits karstiques:

- la présence d'«étages karstiques»
- la présence d'horizons d'inception

Au cours des temps géologiques, les vallées s'approfondissent, créant de nouveaux exutoires et donc de nouveaux réseaux de conduits en relation avec chaque approfondissement. En effet, les conduits se développent principalement au niveau des exutoires karstiques. Chaque exutoire passé est donc à mettre en relation avec un «étage de conduits karstiques». Une évaluation, même grossière, de l'évolution de la position des exutoires karstiques au fil du temps permet d'affiner sensiblement la prévision de conduits karstiques.

Les horizons d'inception sont des surfaces géologiques le long desquelles la karstification s'est développée de manière préférentielle. L'identification d'horizons d'inception dans la série géologique recoupée par un ouvrage permet d'améliorer notablement la prévision de conduits karstiques potentiellement recoupés par un ouvrage.

Ces deux notions sont connues depuis quelques années dans la littérature spécialisée, mais leur validité en dehors des quelques exemples présentés dans les publications ne faisait guère l'unanimité. Dans le cadre d'une collaboration avec l'EPFL (GEOLEP), soutenue par le Fonds national de la recherche scientifique, un doctorant a analysé de nombreux réseaux karstiques de Suisse et d'ailleurs afin d'y évaluer la validité de l'hypothèse des horizons d'inception. Une méthode d'analyse de la géométrie des réseaux en trois dimensions a dû être mise

au point. Il en ressort assez clairement que des horizons d'inception existent (figure 7). On en trouve grossièrement tous les 20 à 100 mètres dans une série calcaire. Ils peuvent aussi se développer le long du plan de certaines fractures. Il est frappant de constater que 70 à 80 % des galeries des réseaux analysés se trouvent le long de ces horizons.

Le concept d'horizon d'inception existe donc bien et peut s'appliquer de manière assez générale. Pour la prévision, il faudrait cependant savoir comment reconnaître un tel horizon.

Les quelques auteurs ayant travaillé sur la question proposent six causes principales potentielles:

- 1) la présence d'horizons marneux qui forment un écran aux écoulements souterrains, occasionnant une certaine concentration de l'écoulement et donc de la dissolution;

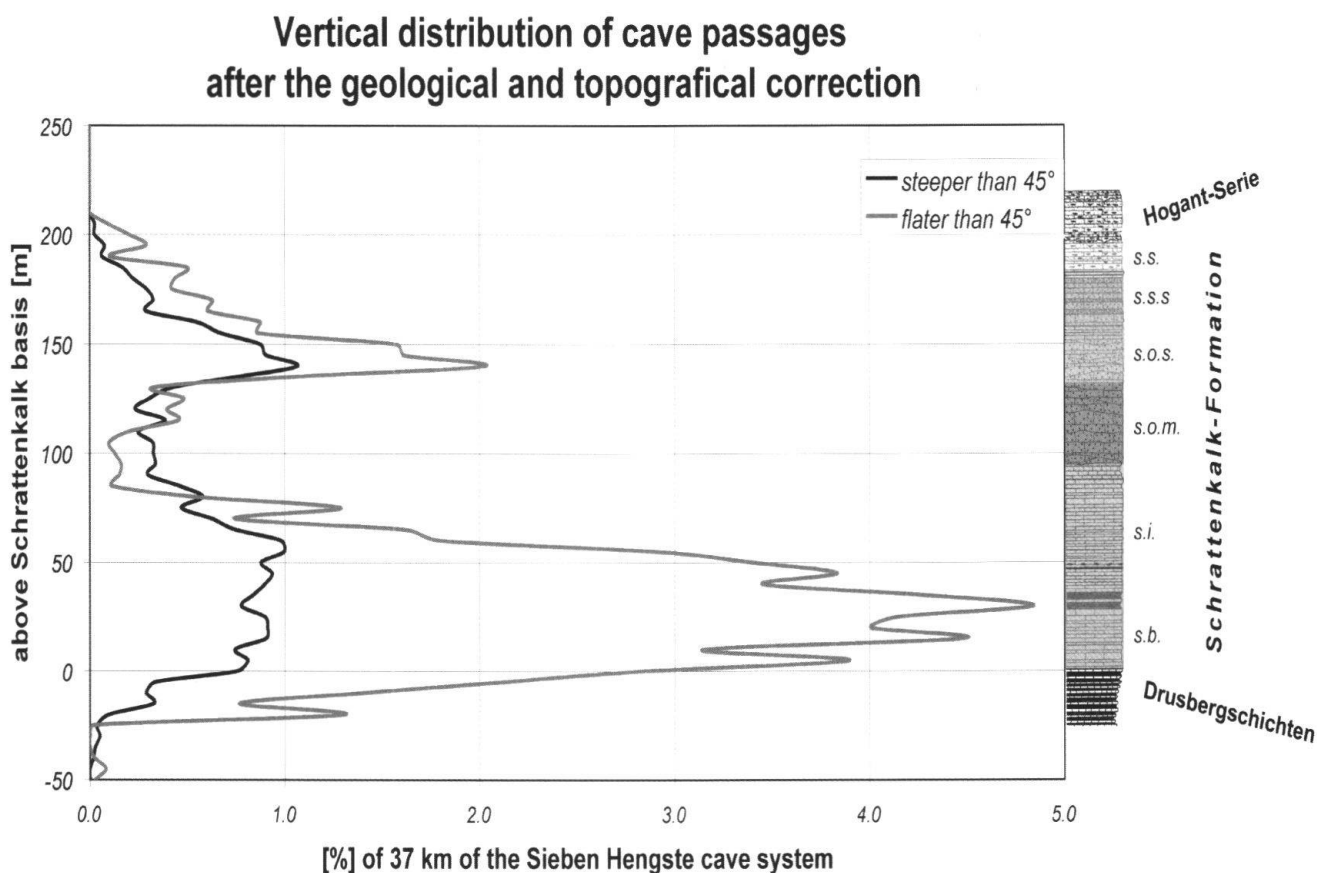


Fig. 7: Analyse spatiale du réseau des Siebenhengste. Cinq horizons principaux d'inception ressortent de cette analyse. D'après Filipponi & Jeannin (2006).

- 2) la perméabilité initiale de la roche dans certains horizons, par exemple liée à une couche plus poreuse, peut aussi permettre aux eaux de se concentrer le long d'un tel horizon;
- 3) la présence d'une couche contenant des minéraux solubles, par exemple du gypse, peut aussi favoriser la création d'un horizon particulièrement favorable à la karstification;
- 4) un contraste lithologique, en particulier une variation de la teneur en Mg dans la série stratigraphique peut créer des contrastes de perméabilités suffisants pour créer un tel horizon;
- 5) la présence de pyrite ou de matière organique dans un horizon particulier peut favoriser, par oxydation, la production d'acides (H_2S , H_2SO_4 , H_2CO_3) capables de dissoudre préférentiellement la roche;
- 6) La présence de mouvement le long de discontinuités (joints de stratification ou fracture) est un élément qui augmente fortement la perméabilité des discontinuités réactivées et qui peut fortement favoriser la karstification.

L'observation directe dans les galeries souterraines des horizons d'inception repérés par l'analyse de la géométrie des réseaux indique qu'il s'agit généralement de discontinuités de quelques centimètres d'épaisseur, souvent des joints de stratification un peu marneux (hypothèse 1). Nombre d'entre-eux ont visiblement subi des réactivations (déplacements) postérieurs à la formation des conduits karstiques et pourraient donc en avoir subi aussi au moment de l'initiation de la karstification. L'hypothèse 6 s'avère donc possible voire probable. Nombre de galeries présentent des cristaux, croûtes et concrétions de gypse qui pourraient traduire un effet de l'hypothèse 5. A ce stade, les études se concentrent sur l'analyse détaillée de la nature et de la composition des horizons d'inception que nous avons pu identifier jusqu'ici. Nous espérons parvenir à évaluer le poids respectif des hypothèses mentionnées ci-dessus.

Dès 2007, avec le GEOLEP, nous envisageons donc de pouvoir travailler à l'élaboration de recommandations pratiques proposant une méthode concrète pour identifier les étages de karstification ainsi que les horizons d'inception et combiner ces données pour permettre des prévisions. La méthode devrait être validée par des applications à différents cas réels en 2008 et être mise à disposition des géologues en 2009.

Parallèlement, nous réfléchissons à l'amélioration des méthodes géophysiques de détection des cavités souterraines, qui reste encore fastidieuse et incertaine, voire assez souvent simplement impossible.

Bibliographie

- Filipponi, M. & Jeannin, P.-Y. (2006): Is it possible to predict karstified horizons in tunnelling? - *Austrian Journal of Earth Sciences*, 99, 24-30.
- Ford, D.C. & Williams, P.W. (1989): *Karst geomorphology and hydrology*. - Chapman & Hall, London, 601 p.
- Häuselmann, Ph., Granger, D.E., Lauritzen, S.-E. & Jeannin, P.-Y. (2007): Abrupt glacial valley incision at 0.8 Ma dated from cave deposits in Switzerland. - *Geology* 35(2), 143-146.
- Jeannin, P.-Y. (1995): Comportement hydraulique mutuel des volumes de roche peu perméable et des conduits karstiques: conséquences sur l'étude des aquifères karstiques. - *Bulletin d'hydrogéologie* 14, 113-138.
- Klimchouk, A., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W., Editors (2000): *Speleogenesis: Evolution of Karst aquifers*. - National Speleological Society, Huntsville, USA, 527 p.
- Milanovic, P. (2004): *Water resources engineering in karst*. - CRC press, Taylor & Francis, London, 328 p.
- Wenger, R. et al. (2006): *Cavernes - face cachée de la Terre*. - Editions Nathan, Paris, 239 p.
- Wildberger, A. & Preiswerk, Ch. (1997): *Karst et grottes de la Suisse*. - Speleo Projects, Basel, 208 p.