

6. Eléments pour l'évaluation des dangers naturels en milieux karstiques

par

Jonathan VOUILAMOZ¹ & Pierre-Yves JEANNIN¹

Résumé.—VOUILAMOZ J. & JEANNIN P.-Y., 2013. Eléments pour l'évaluation des dangers naturels en milieux karstiques. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 83-91.

Les milieux karstiques présentent des propriétés hydrodynamiques particulières – mise en charge, flux variables aux limites – ayant une implication directe sur les dangers naturels tels que les dangers de crue et les dangers gravitationnels. Ces propriétés sont souvent ignorées lors de l'évaluation de tels dangers. La raison principale est l'absence de méthode appliquée tenant compte des spécificités des milieux karstiques. Le présent article vise donc (i) à préciser la notion de systèmes karstiques pour la rendre compréhensible à tout un chacun, (ii) à présenter une méthode d'investigation spécifique aux propriétés du karst et (iii) à utiliser cette méthode pour l'évaluation de dangers naturels en milieux karstiques.

Mots clés: Systèmes karstiques, KARSYS, dangers naturels, mise en charge, flux aux limites.

Abstract.—VOUILAMOZ J. & JEANNIN P.-Y., 2013. Aspects of natural hazards in a karst environment. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 83-91.

Karst areas are characterized by specific hydrodynamic behavior – hydraulic head variability or flux variability at the boundary of the system – involved in natural hazards such as flood events or landslides. During natural hazards mapping, these characteristics are often misused or ignored due to the lack of applicable method for karst system characterization. The present paper aims to (i) describe the concept of karst system, (ii) present a specific method for karst system characterization and (iii) show how to use the method for natural hazard investigations.

Keywords: Karst systems, KARSYS, natural hazards.

¹Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie (ISSKA); tél.: +41 (0)32 913 35 33.
E-mail: jonathan.vouillamoz@isska.ch

INTRODUCTION

Les milieux karstiques présentent tant des dangers de crues – à l'exutoire du système – que des dangers gravitationnels – au sein du système – fortement dépendants de leurs propriétés hydrodynamiques spécifiques. La notion de «système karstique» permet une approche globale de ces dangers. L'évaluation d'un tel système nécessite la compréhension de la géométrie du système, de son extension, des interactions à ses limites et une interprétation de sa dynamique globale tenant compte des propriétés du karst.

Les deux principales propriétés du karst qui influent sur la situation de danger sont la variabilité des flux entrant et sortant aux limites du système et la capacité de mise en charge de celui-ci. La première influence le débit de la source alors que la deuxième joue un rôle dans le risque d'inondation et de mise en mouvement de glissements de terrain.

DÉFINITION ET PROPRIÉTÉS D'UN SYSTÈME KARSTIQUE

Géologie et structure

Un système karstique est le volume d'aquifère correspondant au bassin d'alimentation (SA) pour lequel tout ou partie de la recharge diffuse (R_{diff}) arrive forcément à l'exutoire (figure 1). Contrairement à un système poreux dont les limites sont données par la crête topographique, la géométrie et l'extension d'un système karstique sont définies par la nature des roches et la structure géologique. Le karst se développe uniquement dans les roches solubles à l'eau, à savoir principalement, les carbonates et les évaporites. Il ne se développe pas dans les roches imperméables, telles que les schistes et les roches ignées par exemple. Ainsi, dans une série sédimentaire carbonatée, les aquifères karstiques se développent dans les couches calcaires et sont limités par les niveaux marneux, jouant le rôle d'aquiclude.

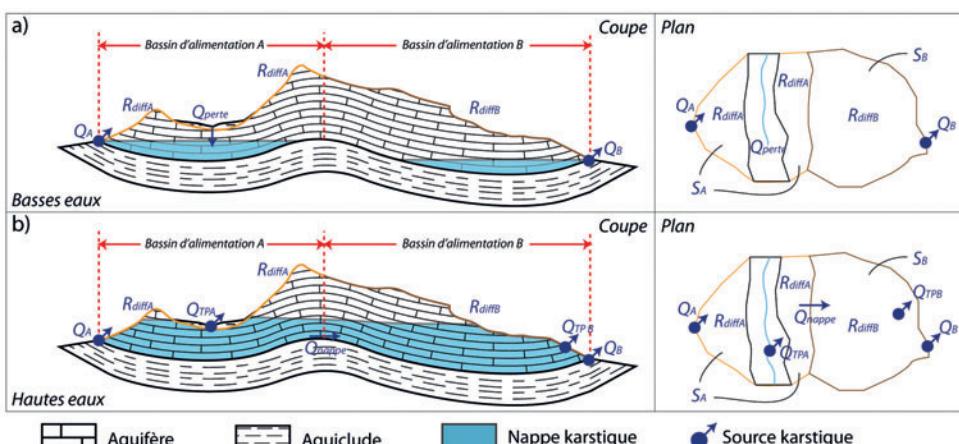


Figure 1.–Flux aux limites de deux systèmes karstiques contigus en situation de basses eaux et de hautes eaux, en coupe et en plan. Le bilan hydrologique du bassin B en basses eaux s'entend comme $R_{diffB} = Q_B$. En hautes eaux, ce même bilan s'écrit $R_{diffB} + Q_{nappe} = Q_B + Q_{TPB}$.

Comme le montre la figure 1, c'est donc la géométrie de l'aquiclude qui régit les limites inférieures et latérales du système.

Circulations dans le karst

Trois niveaux sont à distinguer dans le karst. Au sommet, occupant les premiers mètres sous la surface ou sous la couverture meuble, l'épikarst est une couche fortement érodée chimiquement, présentant une porosité élevée. Il joue un rôle tant de réservoir que de drain rapide vers des puits verticaux. Sous l'épikarst se trouve la zone vadose du système. Elle est caractérisée par un réseau tridimensionnel de conduits karstiques dans une matrice ou volume de roche peu perméable (VPP). Ce réseau draine les eaux de l'épikarst et des VPP vers le niveau de base du système, que ce soit l'aquiclude ou la nappe (PERRIN 2003, SAVOY 2007). Il est formé principalement des puits verticaux et des conduits développés dans des niveaux d'inception, parallèles à la stratigraphie (FILIPPONI *et al.* 2009). En dessous de la zone vadose, vient la zone saturée qui forme la nappe karstique. Le niveau de la zone saturée en étage est donné par l'altitude de l'exutoire pérenne du système (KIRALY 1973). Le drainage dans la zone saturée suit naturellement le gradient hydraulique. Lors d'un événement de crue, la mise en charge des systèmes karstiques (battement de la nappe karstique) peut atteindre des valeurs surprenantes (La Luire, Vercors, France: mise en charge de 499 m; Höllsch, Préalpes, Suisse: >300 m; Covatannaz, Jura vaudois, Suisse: 60 m).

Flux aux limites du système

Les flux aux limites du système peuvent être nuls, entrants ou sortants (figure 1). Les flux entrants sont (i) la R_{diff} , (ii) les pertes (Q_{perte}) et (iii) les flux souterrains (Q_{nappe}). Les flux sortants sont (i) l'exutoire pérenne (Q), (ii) les trop pleins (Q_{TP}) et (iii) les Q_{nappe} . Le bilan hydrologique du système à stockage nul pose les flux sortants égal aux flux entrants. Les différents flux varient dans le temps. Certains d'entre eux peuvent être temporairement entrants et temporairement sortants en fonction de la situation hydrodynamique. Sur la figure 1, les bilans hydrologiques des bassins A et B en basses eaux s'écrivent selon les équations (1) et (2), alors qu'en hautes eaux, ils s'écrivent selon les équations (3) et (4):

$$Q_A = R_{diffA} + Q_{perte} \quad (\text{Equation 1})$$

$$Q_B = R_{diffB} \quad (\text{Equation 2})$$

$$Q_A + Q_{TPA} + Q_{nappe} = R_{diffA} \quad (\text{Equation 3})$$

$$Q_B + Q_{TPB} = R_{diffB} + Q_{nappe} \quad (\text{Equation 4})$$

MÉTHODE KARSTYS POUR L'ÉVALUATION DES SYSTÈMES KARSTIQUES

Le présent chapitre synthétise la méthode KARSTYS (karsts systems characterisation) (JEANNIN *et al.* à paraître) basée sur les méthodes développées dans la littérature (KIRALY 1973, BAKALOWICZ 1995, BUTSCHER & HUGGENBERGER 2007). KARSTYS propose une méthode itérative d'évaluation des systèmes karstiques (figure 2).

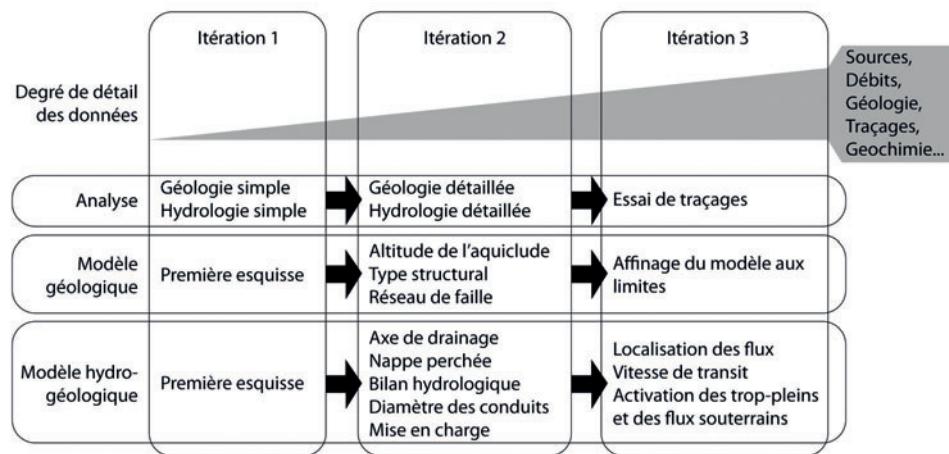


Figure 2.–Méthode itérative d'évaluation d'un système karstique. Le degré de détail de l'analyse progresse avec les itérations.

Première itération

La première itération vise à obtenir une idée globale du système. Pour ce faire, il faut rechercher les différents exutoires du système (pérennes et temporaires) et estimer leurs débits en basses eaux et en hautes eaux. Les exutoires d'un même système karstique peuvent être très éloignés l'un de l'autre. Certains peuvent être dissimulés dans le lit d'une rivière ou être sous-lacustre, ce qui rend la recherche difficile.

Une première analyse de la structure géologique et des limites du système doit être faite à partir des cartes et coupes géologiques existantes. L'objectif est d'avoir une première esquisse de la géométrie en 3D de l'aquiclude afin d'obtenir une esquisse des limites du système. Il est également nécessaire de se faire une première idée de l'infiltration et du drainage en surface. Une rapide étude sur orthophotos permet de déterminer si l'infiltration peut être considérée comme homogène ou s'il convient de définir différentes classes.

Cette première itération donne une idée générale de la recharge, de la décharge et de la structure géologique du bassin. Ces résultats peuvent être combinés entre eux grâce aux principes suivants: (i) l'aquifère est saturé en dessous du niveau des sources pérennes. L'extension de la nappe karstique peut être estimée par l'intersection d'un plan horizontal à l'altitude de la source avec la surface de l'aquiclude (KIRALY 1973) ce qui donne une première approximation du volume de la nappe. Une telle étude a été menée par

(EICHENBERGER 2008) afin d'évaluer la réserve d'eaux karstiques à l'échelle de la Suisse; (ii) en considérant les débits des différentes sources, une première évaluation de la surface du bassin d'alimentation sur la base d'un débit spécifique estimé peut être faite et comparée avec le bassin évalué à partir du modèle 3D géologique; (iii) l'intégration des sources temporaires à ce premier modèle permet de faire une esquisse de la situation du système en hautes eaux et d'évaluer les flux souterrains éventuels.

Deuxième itération

La deuxième itération vise à préciser principalement le modèle géologique et le bilan hydrologique. Des données plus détaillées quant aux débits des sources, aux mises en charges et à la géologie sont nécessaires pour mener à bien cette étape.

Le modèle géologique doit être précisé. Une attention particulière est donnée aux limites du bassin et aux éventuelles interactions avec des bassins limitrophes, ceci en précisant l'altitude de l'aquiclude aux seuils probables ainsi que l'emplacement et le rejet existant sur les failles majeures. L'altitude du fond des synclinaux, leurs types structuraux et les limites du système doivent être investigués en détail.

L'extension du bassin d'alimentation (le système karstique) peut être précisée par une analyse rapide des débits spécifiques, des essais de traçages existants et des observations en grottes.

Le résultat de cette étape permet d'obtenir un modèle plus concret et précis de la géologie et des flux dans le système. Elle met en évidence les interactions aux limites du système, notamment les flux souterrains probables. Finalement, elle rend possible la délimitation d'axes de drainage, de nappes perchées, de mise en charge de la nappe en crue et de diamètres de conduits. Ce niveau de précision devrait être utilisé au minimum pour la délimitation de zones de protection avec des méthodes de type EPIK (DOERFLIGER & ZWAHLEN 1998).

Troisième itération

La troisième itération vise à tester le modèle. Pour ce faire, cette étape nécessite la mise en œuvre d'essais de traçages et de mesures de terrain. Le but est de tester certains points aux limites du système. De tels essais permettent une discussion sur les vitesses de transit, les taux de restitution et l'allure de la courbe de restitution par exemple.

Une analyse détaillée des hydrogrammes permet de vérifier l'activation de trop-pleins et les éventuels échanges entre nappes. A ce stade, une modélisation hydrologique est possible si elle tient compte des propriétés du système en question (trop-plein, flux souterrains, pertes). Elle permet de préciser le bilan hydrologique par un modèle élaboré de recharge et une distribution spatiale des précipitations. Ce niveau de détail a par exemple été appliqué au système des sources de l'Aubonne, du Montant, de la Malagne et de la Toleure par (LUETSCHER & PERRIN 2005) et (PERRIN & LUETSCHER 2008).

EVALUATION DES DANGERS NATURELS EN MILIEUX KARSTIQUES

Sur la base de la méthode KARSYS présentée ci-dessus, les premiers éléments pour l'évaluation des dangers naturels en milieux karstiques peuvent être proposés. Les deux types de dangers naturels concernés sont (i) les dangers de crues (crues aux exutoires et inondations) et (ii) les dangers gravitationnels (glissements de terrain et effondrements de dolines). Ils sont tous deux traités dans les sous-chapitres suivants.

Dangers de crues

Afin d'appréhender de façon appropriée l'évaluation des dangers de crues dans un système karstique, il est nécessaire de connaître les limites du système considéré et la variabilité des flux en fonction de la situation hydrodynamique. Pour ce faire, une étude menée jusqu'à l'itération 2, représentant entre 40 et 60 heures de travail par système, est indispensable.

C'est à l'aide d'un modèle 3D détaillé que l'évaluation des limites est possible. Les mises en charge du système en crue changent fondamentalement l'extension tant verticale qu'horizontale de la zone saturée. Ce changement de géométrie est évalué dans le modèle 3D en modifiant la pente et l'altitude du plan représentant la nappe karstique, afin de simuler une situation de crue.

Les premiers points de repère pour l'évaluation de la mise en charge sont (i) les sources temporaires (ii) les observations en grottes et (iii) le fond des vallées dans le bassin d'alimentation. L'altitude des sources temporaires donne un niveau minimum de mise en charge du système lors de crue. Cette information peut aisément être comparée au débit de la source pérenne, ce qui permet de donner une première relation mise en charge vs débit. Les observations en grottes montrent soit que la grotte est noyée lors des crues, auquel cas une sonde de pression peut être installée et permet de mesurer la mise en charge réelle dans le système, soit que la grotte n'est jamais noyée, auquel cas la profondeur de la grotte donne une limite maximale à la mise en charge. Finalement, le fond des vallées indique soit qu'il est inondé en situation de crue, auquel cas la mise en charge maximale est l'altitude de la vallée ce qui donne une deuxième relation mise en charge vs débit, soit qu'il n'est jamais inondé auquel cas l'altitude du fond de la vallée donne une limite maximale à la mise en charge.

Cette démarche montre rapidement et efficacement les lieux où des exutoires temporaires (Q_{TP}) sont probables et les lieux où des flux souterrains (Q_{nappe}) sont possibles. Dès lors que la relation mise en charge vs débit est évaluée à l'aide des points de repère décrits ci-dessus, il est aisément d'évaluer à partir de quel débit les différentes limites passent d'un flux nul à un flux entrant, respectivement sortant. La figure 3 montre un cas fictif de deux bassins d'alimentation limitrophes séparés par un seuil.

En situation de basses eaux, les deux nappes sont indépendantes. Un trop plein du système A est connu en hautes eaux 90 m plus haut que l'exutoire pérenne Q_A . L'altitude de la nappe A en hautes eaux peut ainsi être esquissée. Il est alors aisément de constater que la mise en charge nécessaire à l'activation de ce trop-plein est supérieure à celle nécessaire à la nappe B pour se déverser dans la nappe A. Ainsi, la situation des nappes en moyennes eaux peut être simulée et montre un débordement de la nappe B dans la nappe A pour une mise en charge de 66 m (situation en moyennes eaux sur la figure 3).

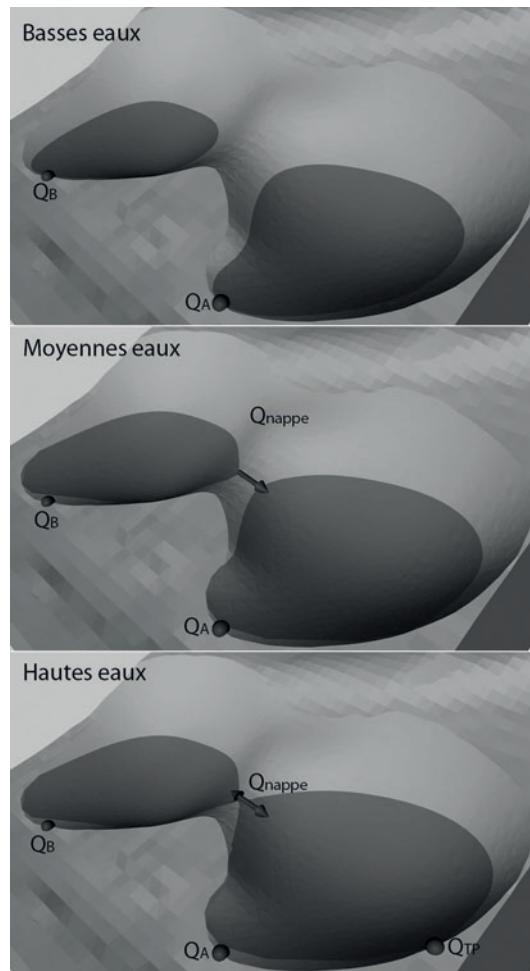


Figure 3.–Situation en basses, moyennes et hautes eaux de deux bassins limitrophe séparés par un seuil souterrain. Le volume visible représente l'aquiclude des deux systèmes. Le volume aquifère a été effacé afin de permettre une meilleure visualisation de la nappe.

Lors de l'évaluation des dangers de crue de la source ayant pour débit Q_A , l'estimation des débits doit donc tenir compte (i) de R_{diffA} , (ii) de Q_{nappe} à partir d'une mise en charge de 66 m dans le bassin B et (iii) de Q_{TP} à partir d'une mise en charge de 90 m dans le bassin A.

Une fois toutes les limites du système connues, une modélisation hydrologique peut être menée d'une manière sensée. Lors de l'application de la méthode présentée ici à une étude pilote de dangers naturels en milieux karstiques pour le canton du Jura, le programme de modélisation hydrologique développé par le bureau e-dric a été utilisé (JORDAN *et al.* 2006). Ce modèle permet l'intégration et le paramétrage des différentes propriétés du karst tels que les échanges entre nappes (Q_{nappe}), les apports allochtones (Q_{perte}) et l'activation de trop-pleins (Q_{TP}). Alors que les études précédentes sur le même bassin n'avaient pas permis

de modéliser convenablement le débit de la source concernée, l'application de la méthode KARSYS couplée à la modélisation hydrologique proposée par le bureau e-dric a donné une réponse satisfaisante pour l'évaluation des débits de crues (BALMER *et al.* 2010).

C'est donc dans le cadre de l'application des directives de l'OFEV pour la protection contre les crues des cours d'eau (WILLI *et al.* 2001), notamment pour l'évaluation des crues trentenales, centennales et trois-centennales, communément admises selon la matrice des dangers, que cette méthode doit être appliquée et que l'évaluation des débits doit tenir compte des flux aux limites comme explicité dans les équations (1) à (4).

Dangers gravitationnels

Cette même démarche permet également de mettre en évidence les relations entre la nappe karstique et la surface topographique du bassin. Comme expliqué précédemment, le battement de la nappe karstique peut atteindre des dizaines, voire des centaines de mètres en fonction de la géométrie du système. Ainsi, elle peut atteindre par le dessous les versants d'une vallée comprise dans le bassin d'alimentation et y exercer une pression favorisant l'activation de glissements de terrain.

Ainsi, lors de l'application de la méthode décrite ici, la simulation de la mise en charge maximale de la nappe karstique dans le modèle 3D géologique devrait être utilisée en combinaison avec les données de topographie et de géologie de surface pour évaluer si un tel risque est présent ou pas. Cette hypothèse fera l'objet de futures recherches

BIBLIOGRAPHIE

- BAKALOWICZ M., 1995. La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structures et fonctionnement. *Hydrogéologie* 4: 3-21.
- BALMER F., HELLER P., JORDAN F., JEANNIN P., VOUILAMOZ J., BOESCH F. & PRESSACCO G., 2010. Bases méthodologiques d'étude des zones karstiques en vue de la réalisation des cartes de dangers naturels. Technical report: RWB, ISSKA, e-dric.
- BUTSCHER C. & HUGGENBERGER P., 2007. Implications for karst hydrology from 3D geological modeling using the aquifer base gradient approach. *Journal of Hydrology* 342: 184-198.
- DOERFLIGER N. & ZWAHLEN F., 1998. Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK). Guide pratique. Technical report: Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Berne, Suisse.
- EICHENBERGER U., 2008. Abschätzung des Karstwasservolumens in der Schweiz. Technical report: ISSKA.
- FILLIPONI M., JEANNIN P. & TACHER L., 2009. Evidence of inception horizons in karst conduit networks. *Geomorphology* 106: 86-99.
- JEANNIN P.-Y., EICHENBERGER U., SINREICH M., VOUILAMOZ J., MALARD A., WEBER E., (Submitted): KARSYS: a pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation. Application to the assessment of groundwater reserve and resources in Switzerland. Submitted to *J. of Environmental Earth Sciences*.
- JORDAN F., BOILLAT J., DUBOIS J., SCHLEISS A. J. & HINGRAY B., 2006. Flood prediction and optimization model for realtime management of the upper Rhone river bassin. Unpublished.
- KIRALY L., 1973. Notice explicative de la carte Hydrogéologique du Canton de Neuchâtel. *Bulletin de la Société neuchâteloise des Sciences naturelles* 96: 1-15.
- LUETSCHER M. & PERRIN J., 2005. The Aubonne karst aquifer (Swiss Jura). *Eclogae geol. Helv.* 98(2), 237-248.
- PERRIN J., 2003. A conceptual model of flow and transport in a karst aquifer based on spatial and temporal variations of natural tracers. PhD Thesis: CHYN.

- PERRIN J. & LUETSCHER M., 2008. Inference of the structure of karst conduits using quantitative tracer tests and geological information: example of the Swiss Jura. *Hydrogeology Journal*, 16, 951-967.
- SAVOY L., 2007. Use of natural and artificial reactive tracers to investigate the transfer of solutes in karst systems. PhD Thesis: CHYN.
- WILLI H. P., JORDAN J., ROTHE U. & FREI B., 2001. Protection contre les crues des cours d'eau - Directives de l'OFEG. Technical report: OFEG, OFEV, OFDT, OFEFP, OFAG.