

Thèse de doctorat
Par Johan Jouve

Origine, caractérisation et distribution prédictive des structures karstiques - De la karstologie aux modèles numériques 3D

Université Aix-Marseille, [CEREGE](#)
Projet [DARDENNES](#) – 2014 – 2018

Le lundi 14 mai 2018 – 14h30

Laboratoire CEREGE, Grand Amphi (bâtiment CEREGE) sur le site de l'Arbois
(<https://www.cerege.fr/fr/le-cerege/acces>), entre Aix-les-Milles et la gare TGV

Devant le jury composé de

Philippe Audra, Université de Nice-Sophia Antipolis (Rapporteur) ; **Nicolas Massei**, Université de Rouen Normandie (Rapporteur) ; **Pauline Collon**, Université de Lorraine (Examinateur) ; **Stéphane Jaillet**, Université de Savoie Mont Blanc (Examinateur) ; **Bruno Arfib**, Université Aix-Marseille (Invité) ; **Hubert Camus**, Cenote (Invité) ; **Laurent Cadilhac**, Agence de l'Eau (Invité) ; **Nicolas Rampoux**, Veolia (Invité) ; **Sophie Viseur** et **Yves Guglielmi**, Université Aix-Marseille (Co-directeurs)

Résumé

La caractérisation des hétérogénéités du sous-sol est une des préoccupations principales des études visant à qualifier et quantifier le comportement d'un réservoir d'eau ou d'hydrocarbure. Dans le cas de réservoirs karstiques, cette hétérogénéité régionale est principalement due à la présence d'un réseau de conduits hiérarchisés, connectant une zone de recharge à une zone de restitution, et se comportant comme des drains pour l'écoulement souterrain. Cependant, seule une partie restreinte de ces conduits est généralement humainement observable, et la connaissance globale du système reste limitée. Il existe alors beaucoup d'incertitudes quant à la position, la géométrie et le comportement dynamique d'un réseau karstique à l'échelle d'un massif. Les simulations stochastiques géostatistiques représentent un moyen d'étudier les différentes configurations des réseaux karstiques tridimensionnels (3D) probables et ainsi de déterminer les incertitudes sur le comportement du réservoir. Etablir une telle démarche demande de comprendre les étapes de structuration du karst afin de reconstituer numériquement son organisation 3D, au vu des incertitudes qui peuvent exister. Ainsi, une approche pluridisciplinaire et méthodologique est proposée dans ce travail pour répondre à cette problématique. Elle repose (i) sur la géologie et la karstologie de terrain et (ii) sur la géologie numérique, incluant la modélisation structurale 3D et la simulation géostatistique.

Une des particularités des réseaux karstiques est qu'ils s'organisent de manière hiérarchique au sein de l'encaissant. Leur distribution et leur organisation sont étroitement liées à des paramètres statiques (géologiques) et dynamiques (hydrologiques), et dépendent de l'évolution géomorphologique du massif étudié. L'analyse de la structuration d'un réservoir karstique est ici réalisée avec deux objectifs principaux : (i) la détermination des phases de structuration karstique pour comprendre et prévoir le fonctionnement du système, et (ii) la détermination de données de conditionnement permettant de simuler des réseaux karstiques réalistes et de réduire les incertitudes. Les déterminations karstologiques permettent d'identifier la morphogénèse des formes exo- et endokarstique. Les reconstitutions spéléogénétiques qui en découlent permettent d'identifier les phases successives de structuration du système karstique (spéléogénèse épigène ou hypogène, évolution du niveau de base, etc.) permettant de définir une zonation de l'occurrence de l'organisation des structures karstiques (zone vadose, épiphréatique ou phréatique). En parallèle, l'analyse quantitative des géométries et des topologies de données 3D de cavités analogues a permis de comparer les différentes structures de réseaux karstiques liées à différents processus spéléogénétiques. De fait, ces analyses morphométriques fournissent une base de données quantitative de caractéristiques morphologiques de cavités en fonction de leurs processus spéléogénétiques. Enfin, deux approches géostatistiques ont été testées pour la génération de réseaux karstiques. Elles reposent sur l'utilisation de méthodes classiques de géostatistiques basées-pixel : la simulation séquentielle d'indicatrice (SIS) et les simulations multipoints (MPS). Dans ce travail, l'attention a été portée sur l'intégration de données géologiques, karstologiques et hydrologiques, ainsi que sur la reproduction de l'organisation hiérarchique des systèmes karstiques. Le travail contribue à définir comment

intégrer des connaissances *a priori* sous forme de données dures (points d'entrée et de sortie, cavités connues, etc.) et de données secondaires (tendances, proportions, probabilité d'occurrence). Ces approches permettent de simuler différents faciès karstiques inhérents à une zonation du réservoir karstique en relation avec l'histoire spéléogénétique. Elles ont été testées sur des cas synthétiques pour validation et sur un cas d'étude pour l'une d'entre elles.

Mots-clefs : Spéléogénèse, karst, géostatistique, simulation stochastique, géométrie, topologie

Abstract

The characterization of underground heterogeneities is one of the main concerns for qualifying and quantifying petroleum or water reservoir behaviors. In the case of karst reservoirs, the regional heterogeneity is mainly due to the presence of a hierarchical network of conduits, connecting a recharge zone to a restitution zone, and behaving as drains for underground fluid flows. However, the humanly observed karst conduits represent only a limited part of the complete karst conduit system. Therefore, many uncertainties exist concerning the location, the geometry and the dynamic behavior of a karst network at the massif scale. Geostatistical stochastic simulations represent an interesting tool to study the different three-dimensional (3D) probable configurations of karst networks and then, to determine the uncertainties on the reservoir behaviors. This problematic is a major challenge not only in the field of water, hydrocarbon and mineral resources, but also in civil engineering. This approach first requires understanding the successive stages of karst structuring of a reservoir and then to numerically reconstruct the 3D organization of karstic structures, given the uncertainties that may exist. Thus, a multidisciplinary and methodological approach was proposed in this work to address these issues. It is based on (i) field geology and karst studies and (ii) on numerical geology, including 3D structural and geostatistical modeling.

The hierarchical organization of the karst networks within the geological host represents a key particularity of these features. Their distribution and organization is closely related to static (geological) and dynamic (hydrological) parameters, and depends on the geomorphological evolution of the studied massif. The analysis of the karst structuring steps of a reservoir is here carried out with two main objectives: the determination of karst structuring phases to understand and predict the functioning of the system, and the definition of conditioning data for simulating realistic karst networks and reducing uncertainties. Karstological determinations allow identifying the morphogenesis of the exo- and endokarst forms. Then, the speleogenetic reconstitutions make it possible to identify the successive phases of the karst system structuration (epigenic or hypogenic speleogenesis, evolution of base level, etc.) allowing to define the type and the zonation of karst pattern occurrence (karst zonation : vadose, epiphreatic or phreatic zone). In parallel, a quantitative analysis of the geometries and the topologies performed on 3D cave surveys permits to compare the different organizations of the karst network patterns, related to speleogenetic processes. This morphometric analysis provides a quantitative database of morphological characteristics according to their speleogenetic processes. Finally, two geostatistical approaches were tested to generate karst networks. They correspond to two classical pixel-based geostatistical methods: the sequential indicator simulation (SIS) and the multipoint simulations (MPS). This work focused on the integration of different data sources (geology, karstology, hydrology) as well as on the ability to reproduce the observed hierarchical organization of karst systems. For instance, the aim was to integrate *a priori* knowledge as hard data (e.g., inlet and outlet points, known cavities) and as secondary data (trends, proportions, probability of occurrence). These approaches make it possible to simulate various karst patterns inherent to a karst reservoir zonation in relation to the speleogenetic history. They have been tested on synthetic cases for validation and one of them on a case study.

Keywords : Speleogenesis, karst, geostatistics, stochastic simulation, geometry, topology

Contact : johan.jouves@gmail.com / arfib@cerege.fr
www.karsteau.fr

Article scientifique de synthèse sur l'analyse des morphologies endokarstiques.

Jouves Johan, Sophie Viseur, Bruno Arfib, Cécile Baudement, Hubert Camus, Pauline Collon, Yves Guglielmi (2017) *Speleogenesis, geometry and topology of caves: a quantitative study of 3D karst conduits*. *Geomorphology*. 298, 86-106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.019>