



Bourse de thèse en hydrogéologie karstique

aux laboratoires UMR Géosciences Montpellier et G-eau Montpellier

2021 – 2024

Titre : Modélisation du fonctionnement hydrogéologique des aquifères karstiques sous contraintes de données géochimiques et géophysiques

Directeur de thèse : Cédric CHAMPOLLION (Univ. Montpellier - GM)

Co-directeur de thèse : Jean-Baptiste CHARLIER (BRGM Montpellier – G-eau)

Employeur : GM – Univ. Montpellier

Laboratoires d'accueil : GM & G-eau Montpellier

Financement bourse doctorale : GM & BRGM (financement acquis)

Ecole doctorale : École doctorale GAIA

Spécialité : STE - Sciences de la Terre et de l'Eau

Début de la thèse prévu : 01 octobre 2021

Date limite de candidature : 4 juin 2021

Mots clés

Karst, géochimie, géophysique, modélisation numérique, ressource en eau souterraine

Présentation détaillée du projet doctoral

L'eau souterraine est la première ressource d'eau douce au monde, indispensable pour l'irrigation et la sécurité alimentaire (Giordano, 2009). De nombreux pays et grandes métropoles sont dépendants de ressources dites non-conventionnelles, car situées en zones karstiques (Chen et al., 2017). Dans un contexte d'utilisation croissante de la ressource en eau et de réchauffement, il est nécessaire d'évaluer leur sensibilité (en qualité et quantité) aux forçages anthropiques et climatiques.

Les karsts abritent des aquifères complexes conceptualisés par la notion de double, voire triple porosité (Bakalowicz, 2005 ; Goldscheider and Drew, 2007). Cette hétérogénéité engendre une infiltration préférentielle, des transferts rapides à travers le réseau de drainage souterrain, et en parallèle des longs temps de résidence permettant un stockage important de l'eau sur des échelles de temps pluriannuelles. Afin de mieux gérer la ressource en eau dans ces territoires, il est nécessaire de mieux comprendre les écoulements et d'améliorer les modèles conceptuels et numériques du cycle de l'eau à l'échelle de l'aquifère.

Les schémas classiques de l'hydrogéologie karstique confèrent à la zone non saturée (ZNS) un rôle de transfert, et à la zone saturée (ZS) un rôle de stockage ; ce dernier étant assuré principalement par la matrice fissurée. A partir de ce schéma conceptuel, la modélisation des flux hydriques à l'exutoire peut être réalisée à l'aide d'approches parcimonieuses et simples à mettre en œuvre (e.g. Hartmann et al., 2012 ; Mazzilli et al., 2017). Cependant, ce concept appliqué au transport de solutés ne confère à la

ZNS qu'un rôle de transit qui ne permet pas d'expliquer la variété des réponses hydrochimiques et géophysiques mentionnées dans la littérature : des phénomènes de mobilisation de contaminants au cours des crues (Vesper and White, 2003; Huebsch et al., 2014), l'interaction entre les différents compartiments d'un système (Perrin et al., 2007 ; Charmoille et al., 2009 ; Charlier et al., 2012), les phénomènes de stockage au cours des crues (Einsiedl et al., 2010 ; Perrin et al., 2003; Binet et al., 2017) ou à l'échelle saisonnière (Jacob et al., 2010 ; Mazzilli et al., 2016).

En effet, les résultats récents obtenus soulignent le rôle important de la ZNS dans le fonctionnement hydrogéologique des aquifères et leur réponse hydrochimique à l'exutoire (Cholet et al., 2017 ; 2019). Cela est probablement à rattacher au type de recharge ou à l'épaisseur de cette ZNS qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres, rappelant que les voies d'infiltration sont complexes, générant du stockage dans des niveaux « perchés ». Ces zones de stockage dans la ZNS et leur fonction de réservoir superficiel ont été mises en évidence par la géophysique sur le site de l'Observatoire du Larzac (<http://hplus.ore.fr/en/larzac>) dans le cadre de la thèse de Fores (2016 - Université de Montpellier). Des suivis de la pesanteur ou la sismologie ont permis de quantifier ce stockage transitoire dans la ZNS (Fores et al., 2018 ; Champollion et al., 2018).

Objectifs & programme prévisionnel

Les résultats issus de la géochimie et de la géophysique révèlent le rôle de la ZNS sur la qualité et la quantité de la ressource, qui est - en général – non prise en compte en raison des suivis réalisés uniquement à l'exutoire du système karstique. Combiner ces 2 approches dans les modèles de fonctionnement hydrogéologique va permettre d'intégrer des informations sur l'origine de l'eau, les transferts et les stockages au sein des différents compartiments des systèmes karstiques, et in fine permettre de mieux caractériser les processus de recharge et la sensibilité de ces aquifères aux forçages anthropiques et climatiques.

Cette thèse vise à améliorer la compréhension des systèmes karstiques en contraignant les modèles de fonctionnement par les informations issues de la géochimie et de la géophysique. Le projet de thèse inclut 2 axes de recherche :

- Le rôle de la ZNS (mode de recharge, occupation des sols et variabilité spatiale) sur la qualité et la quantité de la ressource en eau souterraine à l'aide d'une analyse croisée des suivis hydrogéologiques, hydrochimiques et géophysiques continus. La géophysique est utilisée pour contraindre la quantité de flux infiltrée et doit permettre une estimation plus réaliste du stock d'eau disponible dans la ZNS. La géochimie est utilisée pour caractériser l'origine de l'eau et mieux contraindre les temps de résidence au sein des compartiments de la zone d'infiltration.
- L'estimation de la recharge à l'aide de la modélisation des transferts dans la zone d'infiltration et à l'exutoire en couplant la simulation des flux hydriques, des flux de solutés et des signaux géophysiques. La géophysique est sensible à la recharge diffuse, et la recharge localisée de zones allochtones porte une signature géochimique spécifique qui peut se conserver jusqu'à l'exutoire. Dans un premier temps, des modèles d'écoulement simples seront utilisés (e.g. modèles à réservoir, cf. Charlier et al., 2012 ; Hartmann et al., 2013 ; Mazzilli et al., 2013). L'utilisation de modèles numériques à base physique sera évaluée dans un second temps sur la base de structures simples en 1D (conduit karstique principal dans une matrice fissurée, cf. Dewaide et al., 2016 ; Cholet et al., 2017). Une complexification des modèles d'infiltration sera envisagée selon le type de variables prises en compte et un focus sera

réalisé sur les incertitudes associées à l'utilisation de données indépendantes pour simuler les flux hydriques.

Sites d'étude envisagés

Pour réaliser cette convergence géochimie-géophysique, il est nécessaire de disposer de sites instrumentés et de suivis à des échelles de temps variées et dans les différents compartiments ZNS et ZS du karst. Les sites d'étude visés sont donc des aquifères karstiques comportant déjà sur plusieurs cycles hydrologiques des suivis à haute fréquence des paramètres physico-chimiques semi-conservatifs à l'échelle de la crue tels que la conductivité électrique, ou les nitrates (ces paramètres nous renseignent sur les dynamiques de mélange et de mobilisation des différents compartiments : eau nouvelle/eau ancienne, mobilisation d'éléments, etc.). Un focus sera fait sur les sites du Durzon sur le Larzac (hydrochimie et géophysique continue – <http://hplus.ore.fr/en/larzac>), de la Loue et du Verneau dans le Jura (hydrochimie continue et physico-chimie), de la Fontaine de Nîmes (hydrochimie continue et physico-chimie – <http://sokarst.org>). Ces trois sites nous permettent d'étudier les écoulements dans la ZNS à travers différentes modalités et dynamiques de recharge.

Encadrement

L'encadrement sera assuré par Cédric Champollion (MCF, Laboratoire Géosciences Montpellier, UM - 50%) spécialisé en hydro-géophysique et Jean-Baptiste Charlier (chercheur, DEPA / NRE, BRGM, Montpellier – 50%) spécialisé en hydrogéologie et hydrochimie des aquifères karstiques.

Profil et compétences recherchées

Le (la) candidat(e) devra posséder un master (ou niveau équivalent) en hydrogéologie avec des connaissances en géochimie et géophysique. Un intérêt pour le terrain et des connaissances en hydrogéologie karstique sont des éléments déterminants pour le recrutement du candidat. Une appétence pour la modélisation numérique est requise ; la maîtrise d'outils de programmation (code Matlab/Fortran/R...) est un plus.

Candidature

Pour candidater, envoyez CV+LM ainsi qu'une lettre de recommandation à Jean-Baptiste Charlier ([j.charlier\[at\]brgm.fr](mailto:j.charlier[at]brgm.fr)) et Cédric Champollion ([cedric.champollion\[at\]umontpellier.fr](mailto:cedric.champollion[at]umontpellier.fr)) – date limite de réception des dossiers par mail le 4 juin 2021.

Une sélection des candidats pour audition sera effectuée début juin, pour un entretien prévu fin juin - début juillet 2021.

Contacts pour tout renseignement (privilégier l'email en période de confinement Covid-19) :

Jean-Baptiste Charlier
[j.charlier\[at\]brgm.fr](mailto:j.charlier[at]brgm.fr)
+33 (0)4 67 15 79 77
BRGM - DEPA / NRE
1039, rue de Pinville
34000 Montpellier

Cédric Champollion
[cedric.champollion\[at\]umontpellier.fr](mailto:cedric.champollion[at]umontpellier.fr)
+33 (0)4 67 14 36 39
Géosciences Montpellier
Univ. Montpellier
Campus triolet cc060
Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier cedex 05

Références bibliographiques

- BAKALOWICZ, M. (2005). KARST GROUNDWATER : A CHALLENGE FOR NEW RESOURCES. *HYDROGEOLOGY JOURNAL* 13 (1), 148–160. BARTH, J. A, S., E. JOIGNEAUX, H. PAUWELS, P. ALBÉRIC, C. FLÉHOC, AND A. BRUAND (2017). WATER EXCHANGE, MIXING AND TRANSIENT STORAGE BETWEEN A SATURATED KARSTIC CONDUIT AND THE SURROUNDING AQUIFER: GROUNDWATER FLOW MODELING AND INPUTS FROM STABLE WATER ISOTOPES. *JOURNAL OF HYDROLOGY* 544, 278 – 289.
- CHAMPOLLION, C., DEVILLE, S., CHÉRY, J., DOERFLINGER, E., LE MOIGNE, N., BAYER, R., VERNANT, P., AND MAZZILLI, N. 2018: ESTIMATING EPIKARST WATER STORAGE BY TIME-LAPSE SURFACE-TO-DEPTH GRAVITY MEASUREMENTS, *HYDROL. EARTH SYST. SCI.*, 22, 3825–3839, <https://doi.org/10.5194/hess-22-3825-2018>.
- CHARLIER J.-B., C. BERTRAND, AND J. MUDRY, 2012. CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL OF FLOW AND TRANSPORT OF DISSOLVED ORGANIC CARBON IN A SMALL JURA KARST SYSTEM. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 460-461:52–64, DOI 10.1016/J.JHYDROL.2012.06.043.
- CHARMOILLE, A., S. BINET, C. BERTRAND, Y. GUGLIELMI, AND J. MUDRY (2009). HYDRAULIC INTERACTIONS BETWEEN FRACTURES AND BEDDING PLANES IN A CARBONATE AQUIFER STUDIED BY MEANS OF EXPERIMENTALLY INDUCED WATERTABLE FLUCTUATIONS (COARAZE EXPERIMENTAL SITE, SOUTHEASTERN FRANCE). *HYDROGEOLOGY JOURNAL* 17 (7), 1607.
- CHEN Z, AULER AS, BAKALOWICZ M, DREW D, GRIGER F, HARTMANN J, JIANG G, MOOSDORF N, RICHTS A, STEVANOVIC Z, VENI G, GOLDSCHIEDER N, 2017. THE WORLD KARST AQUIFER MAPPING PROJECT: CONCEPT, MAPPING PROCEDURE AND MAP OF EUROPE. *HYDROGEOL J*, 25:771–785. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1519-3>.
- CHOLET, C., CHARLIER, J.-B., MOUSSA, R., STEINMANN, M., AND DENIMAL, S., 2017. ASSESSING LATERAL FLOWS AND SOLUTE TRANSPORT DURING FLOODS IN A CONDUIT-FLOW-DOMINATED KARST SYSTEM USING THE INVERSE PROBLEM FOR THE ADVECTION-DIFFUSION EQUATION, *HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES*, 21:3635-3653. DOI: 10.5194/hess-21-3635-2017.
- CHOLET, C., STEINMANN, M., CHARLIER, J.-B., AND DENIMAL, S., 2019. CHARACTERIZING FLUXES OF TRACE METALS RELATED TO DISSOLVED AND SUSPENDED MATTER DURING A STORM EVENT: APPLICATION TO A KARST AQUIFER USING TRACE METALS AND RARE EARTH ELEMENTS AS PROVENANCE INDICATORS, *HYDROGEOLOGY JOURNAL*, 27:305–319. DOI: 10.1007/s10040-018-1859-2.
- DEWAIDE L, BONNIVER I, ROCHEZ G, HALLET V (2016) SOLUTE TRANSPORT IN HETEROGENEOUS KARST SYSTEMS: DIMENSIONING AND ESTIMATION OF TRANSPORT PARAMETERS VIA MULTI-SAMPLING TRACER TESTS MODELLING USING THE OTIS (ONE-DIMENSIONAL TRANSPORT WITH INFLOW AND STORAGE) PROGRAM. *J HYDROL* 534:567–578
- EINSIEDL, F., M. RADKE, AND P. MALOSZEWSKI (2010). OCCURRENCE AND TRANSPORT OF PHARMACEUTICALS IN A KARST GROUNDWATER SYSTEM AFFECTED BY DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT PLANTS. *JOURNAL OF CONTAMINANT HYDROLOGY* 117 (1), 26–36.
- FORES B. (2016) GRAVIMÉTRIE ET SURVEILLANCE SISMIQUE POUR LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE EN MILIEU KARSTIQUE : APPLICATION AU BASSIN DU DURZON (LARZAC, FRANCE). PHD THESIS. UNIVERSITÉ MONTPELLIER, FRANCE. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01649606>
- FORES, B., CHAMPOLLION, C., MAINSANT, G., ALBARIC, J., & FORT, A. (2018). MONITORING SATURATION CHANGES WITH AMBIENT SEISMIC NOISE AND GRAVIMETRY IN A KARST ENVIRONMENT. *VADOSE ZONE JOURNAL*, 17(1).
- GOLDSCHIEDER, N. AND D. DREW (2007). METHODS IN KARST HYDROGEOLOGY : IAH : INTERNATIONAL CONTRIBUTIONS TO HYDROGEOLOGY, 26. CRC PRESS.
- GIORDANO, M. GLOBAL GROUNDWATER? ISSUES AND SOLUTIONS. *ANNU. REV. ENVIRON. RESOUR.* 34, 153–178 (2009).
- HARTMANN, A., J. LANGE, M. WEILER, Y. ARBEL, AND N. GREENBAUM (2012), A NEW APPROACH TO MODEL THE SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF RECHARGE TO KARST AQUIFERS, *HYDROL. EARTH SYST. SCI.*, 16(7), 2219–2231, doi:10.5194/hess-16-2219-2012.
- HARTMANN, A., WAGENER, T., RIMMER, A., LANGE, J., BRIELMANN, H. AND WEILER, M. 2013. TESTING THE REALISM OF MODEL STRUCTURES TO IDENTIFY KARST SYSTEM PROCESSES USING WATER QUALITY AND QUANTITY SIGNATURES, *WATER RESOUR. RES.*, 49, 3345–3358, doi:10.1002/wrcr.20229.
- HUEBSCH, M., O. FENTON, B. HORAN, D. HENNESSY, K. G. RICHARDS, P. JORDAN, N. GOLDSCHIEDER, C. BUTSCHER, AND P. BLUM (2014). MOBILISATION OR DILUTION ? NITRATE RESPONSE OF KARST SPRINGS TO HIGH RAINFALL EVENTS. *HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES* 18 (11), 4423–4435.
- JACOB, T., BAYER, R., CHERY, J., & LE MOIGNE, N. (2010). TIME-LAPSE MICROGRAVITY SURVEYS REVEAL WATER STORAGE HETEROGENEITY OF A KARST AQUIFER. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: SOLID EARTH*, 115(B6).
- MAZZILLI N., H. JOURDE, T. JACOB, V. GUINOT, N. LE MOIGNE, M. BOUCHER, K. CHALIKAKIS, H. GUYARD, A. LEGTCHENKO. 2013. ON THE INCLUSION OF GROUND-BASED GRAVITY MEASUREMENTS TO THE CALIBRATION PROCESS OF A GLOBAL RAINFALL-DISCHARGE RESERVOIR MODEL: CASE OF THE DURZON KARST SYSTEM (LARZAC, SOUTHERN FRANCE). *ENVIRON EARTH SCI* (2013) 68:1631–1646. DOI 10.1007/s12665-012-1856-z.
- MAZZILLI, N., BOUCHER, M., CHALIKAKIS, K., LEGTCHENKO, A., JOURDE, H., & CHAMPOLLION, C. (2016). CONTRIBUTION OF MAGNETIC RESONANCE SOUNDINGS FOR CHARACTERIZING WATER STORAGE IN THE UNSATURATED ZONE OF KARST AQUIFERS. *GEOPHYSICS*, 81(4), WB49-WB61.
- MAZZILLI N., V. GUINOT, H. JOURDE, N. LECOQ, D. LABAT, B. ARFIB, C. BAUDEMENT, C. DANQUIGNY, L. DAL SOGLIO, D. BERTIN. 2017. KARSTMOD: A MODELLING PLATFORM FOR RAINFALL - DISCHARGE ANALYSIS AND MODELLING DEDICATED TO KARST SYSTEMS *ENVIRON. MODEL. SOFTW.* (2017), 10.1016/J.ENVSOF.2017.03.015
- PERRIN, J., P.-Y. JEANNIN, AND F. CORNATON (2007). THE ROLE OF TRIBUTARY MIXING IN CHEMICAL VARIATIONS AT A KARST SPRING, MILANDRE, SWITZERLAND. *JOURNAL OF HYDROLOGY* 332 (1–2), 158–173.
- PERRIN, J., P.-Y. JEANNIN, AND F. ZWAHLN (2003). EPIKARST STORAGE IN A KARST AQUIFER : A CONCEPTUAL MODEL BASED ON ISOTOPIC DATA, MILANDRE TEST SITE, SWITZERLAND. *JOURNAL OF HYDROLOGY* 279 (1), 106–124.