

# Le Service National d'Observation Karst : pour un suivi à long terme des aquifères karstiques face aux nouveaux extrêmes climatiques

David Labat, Naomi Mazzilli, Bruno Arfib, Vincent Bailly-Comte, Christelle Batiot- Guilhe, Stéphane Binet, Hélène Celle, Laurent Danneville, Célestine Delbart, Juliette Fabre, et al.

▶ **To cite this version:**

David Labat, Naomi Mazzilli, Bruno Arfib, Vincent Bailly-Comte, Christelle Batiot- Guilhe, et al.. Le Service National d'Observation Karst : pour un suivi à long terme des aquifères karstiques face aux nouveaux extrêmes climatiques. Karstologia, 2022, 80, pp.31-40. hal-04013133

**HAL Id: hal-04013133**
**https://hal.science/hal-04013133**

Submitted on 3 Mar 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

David LABAT[1], Naomi MAZZILLI[2], Bruno ARFIB[3], Vincent BAILLY-COMTE[4,5], Christelle BATIOT-GUILHE[6], Stéphane BINET[7], Hélène CELLE[8], Laurent DANNEVILLE[9], Célestine DELBART[10], Juliette FABRE[6], Matthieu FOURNIER[11], Guillaume LORETTE[12], Nicolas MASSEI[11], Yannick MANCHE[13], Nicolas PEYRAUBE[14], Anne PROBST[15], Marc STEINMANN[8], Danièle VALDES[16], David VIENNET[17] et Hervé JOURDE[6]

# Le Service National d'Observation Karst : pour un suivi à long terme des aquifères karstiques face aux nouveaux extrêmes climatiques

RÉSUMÉ : Les karsts sont autant d'aquifères hétérogènes, résultat de la dissolution des roches carbonatées. Ces aquifères constituent aujourd'hui des ressources en eau stratégiques pour les différents usages. Ils sont en même temps très sensibles aux pressions anthropiques et aux changements climatiques en cours. Pour répondre à cette préoccupation sociétale, la communauté des hydrogéologues karstiques a proposé à l'INSU-CNRS la mise en place d'un service national d'observation des systèmes karstiques (SNO KARST). Rassemblant chercheurs et enseignants-chercheurs, cette structure permet aujourd'hui de mettre à la disposition de la communauté une base de données incluant notamment un suivi temporel en termes de qualité et quantité des eaux de plusieurs systèmes karstiques français. De plus, le SNO KARST constitue un lieu d'échanges scientifiques sur les thèmes des protocoles de mesure et de calibration, du traçage naturel ou artificiel, de l'analyse et du traitement du signal, des signatures hydrologiques et physico-chimiques et enfin de la modélisation pluie-niveau-débit. Le SNO KARST est aussi un lieu de formation privilégié pour les étudiants en master et doctorat. Ainsi, depuis 2012, le dispositif SNO KARST a joué un rôle structurant pour la communauté de recherche, et les équipes qui le composent forment aujourd'hui un réseau dynamique sur le plan des échanges scientifiques.
MOTS-CLÉS : aquifères karstiques, observatoire, suivi hydrogéochimique, changement climatique

*ABSTRACT: THE NATIONAL KARST OBSERVATION SERVICE: FOR A LONG-TERM MONITORING OF KARST AQUIFERS IN THE FACE OF NEW CLIMATIC EXTREMES. Karsts constitute heterogeneous aquifers, the result of the dissolution of carbonate rocks. These aquifers are now strategic water resources for different uses. At the same time, they are very sensitive to anthropogenic pressures and ongoing climate change. To answer to this societal concern, the community of karst hydrogeologists proposed to the INSU-CNRS the establishment of a national service for the observation of karstic systems (SNO KARST). Bringing together researchers and teacher-researchers, this structure now makes it possible to provide the community with a database including, in particular, temporal monitoring in terms of the quality and quantity of water from several French karstic systems. In addition, the SNO KARST is now a place for scientific exchanges on the topics of measurement and calibration protocols, natural or artificial tracing, signal analysis and processing, hydrological and physico-chemical signatures and finally rainfall-level-discharge modelling. The SNO KARST is also a privileged training place for master and doctoral students. Thus, since 2012, the SNO KARST system has played a structuring role for the research community and the teams that compose it now constitute a dynamic network in terms of scientific exchanges.*
*KEY WORDS: karst aquifers, observatory, hydrogeochemical monitoring, climate change.*

(1) Université Toulouse 3, Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse UMR 5563 CNRS UPS IRD CNES, david.labat@univ-tlse3.fr
(2) UMR 1114 EMMAH (AU-INRAE), Université d'Avignon, 84000 Avignon, naomi.mazzilli@univ-avignon.fr
(3) Aix Marseille Université, CNRS, IRD, INRAE, Coll France, CEREGE, Aix-en-Provence, France, arfib@cerege.fr
(4) BRGM, Université de Montpellier, 34090 Montpellier, France, v.bailly-comte@brgm.fr
(5) G-eau, UMR 183, INRAE, CIRAD, IRD, AgroParisTech, Supagro, BRGM, Montpellier, France
(6) Université Montpellier, Laboratoire HydroSciences, Montpellier, christelle.guilhe-batiot@umontpellier.fr, juliette.fabre@umontpellier.fr, herve.jourde@umontpellier.fr
(7) Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, Orléans, stephane.binet@univ-orleans.fr
(8) Université de Bourgogne/Franche-Comté, Laboratoire Chrono-Environnement, helene.celle@univ-fcomte.fr, marc.steinmann@univ-fcomte.fr
(9) Parc Naturel Régional des Grands Causses, Millau, laurent.danneville@parc-grands-causses.fr
(10) Université de Tours, EA 6293 GéoHydrosystèmes continentaux, Tours, celestine.delbart@univ-tours.fr
(11) Université de Normandie, Laboratoire de Morphologie Continentale et Côtière, Rouen, France, matthieu.fournier@univ-rouen.fr, nicolas.massei@univ-rouen.fr
(12) Syndicat Mixte des Eaux de la Dordogne, Périgueux, guillaume.lorette@smde24.fr
(13) Etablissement Public Parc National des Cévennes, Florac, yannick.manche@cevennes-parcnational.fr
(14) Université de Bordeaux, Institut de Mécanique et d'ingénierie, nicolas.peyraube@u-bordeaux.fr
(15) Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement, Université Toulouse, CNRS, anne.probst@toulouse-inp.fr
(16) Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS (Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols), F-75005 Paris, daniele.valdes_lao@upmc.fr
(17) Parc Naturel Régional des Causses du Quercy, Labastide-Murat, dviennet@parc-causses-du-quercy.org

## Introduction : Le karst, un milieu fortement hétérogène

L'originalité du karst est liée au processus de karstification, qui peut être résumé en la dissolution d'une roche carbonatée par l'eau qui y circule.

La cinétique de dissolution et donc l'intensité du processus de karstification dépendent de plusieurs facteurs susceptibles de varier dans le temps et l'espace : propriétés de la roche (liées aux conditions de dépôt et de diagenèse et à sa fracturation), acidité des sols et de l'eau, température et caractéristiques d'écoulement (liées à l'organisation du drainage et aux conditions de recharge). Il s'agit d'un processus rapide : le réseau karstique peut donc évoluer sur de courts pas de temps, et porte la marque des histoires géologique, lithologique et hydrogéologique. Il aboutit à une hétérogénéité exceptionnellement marquée, se développant à toutes les échelles, qui entraîne la disqualification de la notion de volume élémentaire représentatif et impose de mener une approche intégratrice des réservoirs karstiques.

Les karsts constituent donc des aquifères au comportement hydrodynamique et hydrogéochimique tout à fait singulier.

La superposition au sein des bassins karstiques d'écoulements à dynamiques très différentes : darcéens (matrice et fissures), turbulents (dans les conduits), de surface (dans les systèmes karstiques avec une recharge rapide et concentrée via des pertes), explique la vaste gamme des temporalités qui est associée à leur fonctionnement hydrologique. Les karsts se caractérisent donc par une forte réactivité aux précipitations, à l'origine d'une variabilité importante de la ressource en eau (sécheresses / inondations). En complément de cette variabilité infra annuelle, ils peuvent aussi enregistrer des fluctuations pluri annuelles de la recharge en réponse aux forçages atmosphériques et aux grandes tendances climatiques pour une région donnée, et ainsi constituer des proxies de ces fluctuations.

Aux exutoires des systèmes karstiques, la qualité des eaux est également très variable et sujette à des épisodes événementiels de contamination de différentes natures. Ces variations de qualité sont le plus souvent naturelles : c'est par exemple le cas des variations brusques de turbidité issues des phénomènes d'érosion (des sols des bassins, ou bien intra-karstiques) faisant suite aux événements météorologiques intenses, et qui posent fréquemment des problèmes importants aux collectivités pour l'exploitation de la ressource. La structure ouverte de l'aquifère et la fréquente absence d'une matrice filtrante rend le karst aussi très vulnérable à tous types de pollutions chimiques d'origine anthropique. C'est le cas par exemple des activités agricoles (pesticides, nitrates) et/ou domestiques (phosphates, bactéries, produits pharmaceutiques etc. liés aux eaux usées) lors des événements de crues.

L'exploitation, la protection et la gestion durable de la ressource en eau karstique représentent par conséquent un réel défi, et nécessitent le développement de méthodes d'investigation et d'outils de gestion à toutes les échelles, notamment du fait de la forte sensibilité de ces aquifères aux impacts du changement climatique [Taylor et *al.*, 2013].

## I. Pourquoi un service national d'observation dédié aux aquifères karstiques ?

Depuis plus de 100 ans, les spéléologues et hydrogéologues étudient et acquièrent des données sur différents hydrosystèmes karstiques. Leurs travaux ont abouti à un modèle conceptuel commun incluant quatre grands sous-systèmes ou compartiments : sol, épikarst, zone vadose et zone saturée. Chaque équipe développe cependant une expertise et une vision dépendante des caractéristiques de son site d'étude, de la nature de l'objet étudié (le paysage, la structure, le développement spéléologique, l'eau), et de la méthodologie qu'elle maîtrise. Dans le passé, la faible structuration de

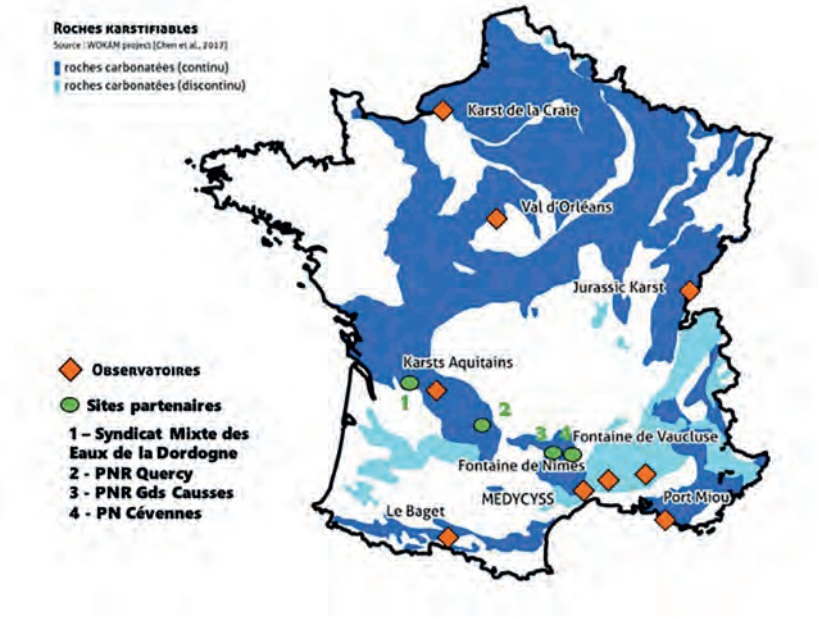



Figure 1 : Localisation des différents sites d'observations du SNO KARST [affleurements carbonatés d'après Chen et *al.*, 2017] (MEDYCYSS : Observatoire Multi-échelle de la DYnamique des Crues et de l'hYdrodynamique Souterraine en milieu karSTiques).
*Location of the various SNO KARST observation sites [carbonate outcrops according to Chen et al., 2017] (MEDYCYSS: Multi-scale Observatory of Flood DYnamics and Underground Hydrodynamics in Karst Environments).*

la communauté du karst s'est traduite par une multiplicité d'approches de modélisation conceptuelle et/ou à base physique, sans pouvoir tirer bénéfice des complémentarités méthodologiques, ni des possibilités offertes par la diversité des sites observés.

L'un des défis majeurs de la recherche sur les karsts est donc de tendre vers une nouvelle approche « synthétique » et intégrative, depuis la caractérisation de leur structure et de leur fonctionnement jusqu'à la modélisation hydrologique, hydrodynamique et hydrochimique des transferts d'eau et de matières au sein des différents compartiments. Ceci nécessite de fédérer les forces d'observation et de recherche pour développer des approches et concepts intégrant une vision plus large des aquifères karstiques, appuyée par des données acquises dans les différents compartiments du karst sous différents environnements, incluant la variété des pressions anthropiques, et par des outils et méthodes de caractérisation ou de modélisation à vocation générique. C'est ce constat qui a motivé la mise en place du SNO KARST (Service National d'Observation Karst) en 2012 (https://sokarst.org/).

Un SNO est constitué d'un réseau d'acteurs de la recherche scientifique qui se fédèrent pour travailler sur un objet ou une thématique commune, chaque équipe assurant l'acquisition de données *in situ* sur le long terme. Ce réseau est labélisé par l'Institut National des Sciences de l'Univers [INSU, 2022]. Le SNO KARST compte 9 sites d'observations (figure 1), chacun composé de plusieurs points d'acquisitions. Le réseau organise la mise à disposition de données et favorise leur utilisation. Ces sites sont également les supports pour le transfert de connaissances vers la société, à travers la caractérisation de l'évolution de la ressource en eau d'un point de vue qualitatif et quantitatif, en réponse à des forçages de courte et moyenne/longue longueur d'onde spatiale ou temporelle. Enfin, le syndicat mixte des eaux de Dordogne (SMED), le parc naturel régional des Grands Causses, le parc naturel régional des Causses du Quercy et le parc national des Cévennes constituent aujourd'hui des partenaires privilégiés du SNO KARST. Ces partenaires mettent également à disposition diverses données acquises sur leurs territoires.

Les problématiques abordées par le SNO KARST se déclinent par conséquent en trois thèmes scientifiques :

- Les mécanismes de transfert et de transport d'eau, de solutés et de particules en milieu karstique.
- Les liens entre structure géologique, lithologique et écoulement.
- L'évolution des flux d'eau et d'éléments en réponse aux changements globaux (climatiques et/ou liés à l'occupation des sols et autres pressions anthropiques).



Photo 1 : La source de Fourbanne (observatoire Jurassic Karst) dans la vallée du Doubs à proximité de Baume-les-Dames (25). Cette source est l'exutoire d'un bassin versant karstique binaire d'une superficie d'environ 30 km². Les suivis hydrogéologiques et géophysiques du site sont réalisés en étroite collaboration avec l'ASDC (Association Spéléo du Doubs Central), qui a exploré et cartographié une bonne partie du réseau souterrain. Cliché Marc Steinmann

*The Fourbanne karst spring in the Doubs valley near Baume-les-Dames (25) of the Jurassic Karst observatory. This spring is the outlet of a binary karst watershed of about 30 km². The hydrogeological and geophysical monitoring of the site is realized in close collaboration with the ASDC (Association Spéléo du Doubs Central), which has explored and mapped a good part of the underground network.*

## II. Stratégie d'observation

L'appréciation de l'évolution des flux d'eau et de matière en entrée et au sein des hydrosystèmes karstiques nécessite d'observer différentes variables climatiques et atmosphériques mais également des variables hydrologiques et hydrochimiques aux exutoires de ces hydrosystèmes ainsi que dans les différents compartiments de ceux-ci (matrice peu fracturée et fissurée, fractures ouvertes et conduits karstiques, épikarst, zone non saturée et zone saturée). Par ailleurs, l'hétérogénéité très forte et la hiérarchisation du réseau karstique (depuis l'entrée jusqu'à l'exutoire) ont pour corollaire une réactivité hydrologique qui s'exprime sur une très large gamme de temporalités. Différencier la part de la variabilité hydro-météorologique et climatique de celle du changement global et des intrants et prélèvements anthropiques impose donc de disposer de séries temporelles longues et continues. Les sites d'observation du réseau ont ainsi été sélectionnés pour répondre aux objectifs du SNO KARST (photos 1 à 10) :

- complémentaires, ils couvrent une diversité de contextes climatiques, lithologiques, structuraux, physiographiques et anthropiques [Binet et *al.*, 2020 ; Jourde et *al.*, 2018 ; Massei et *al.*, 2018] ;
- tous s'appuient sur des chroniques antérieures à la mise en place du service, permettant d'apprécier la réponse à des forçages de long terme [Labat et *al.*, 2022].



Photo 2 : Mesures des paramètres physico-chimiques à la source d'Arcier dans le cadre du projet TRANSKARST (TRANSdisciplinary research on KARST, observatoire Jurassic Karst). La source d'Arcier fournit 50 % de l'alimentation en eau potable de la ville de Besançon. Cliché Hubert Raguet, OZCAR
*Measurement of physico-chemical parameters at Arcier spring in the framework of the TRANSKARST project (TRANSdisciplinary research on KARST). The Arcier spring supplies 50% of the drinking water of the city of Besançon (photo: Hubert Raguet, OZCAR).*

La stratégie d'observation déployée est multi-échelles spatiales et temporelles :

- Les exutoires (sources ou piézomètres) constituent des points de suivi privilégiés car facilement accessibles et intégrateurs. Ils constituent l'axe principal des données produites à long terme. Hauteur, température et conductivité électrique de l'eau (acquisition par sondes de type CTD : Conductivity Temperature Depth) sont systématiquement acquises en continu par des sondes *in situ* et complétées en général par la mesure de la turbidité et de la fluorescence naturelle de la matière organique mais parfois aussi la mesure de certains éléments majeurs tels que les chlorures et nitrates. Aujourd'hui, six des neuf observatoires du SNO sont également équipés de sondes UV-vis pour le suivi en continu de la matière organique (Carbone Organique Total et/ou Dissous). Ces suivis *in situ* sont complétés par des prélèvements (réguliers et/ou suivis de crues) et analyses en laboratoire qui permettent ponctuellement la mesure de la conductivité électrique, des concentrations en éléments majeurs (voire éléments en trace) dont les nitrates et le carbone organique total et/ou dissous, ainsi que des paramètres bactériologiques, voire également des outils géochimiques complémentaires (isotopes stables de l'eau



Photot 3 : Calanque de Port-Miou (Cassis) où la source karstique sous-marine éponyme draine les eaux souterraines rechargées sur un bassin versant de plusieurs centaines de km² en Basse-Provence calcaire (massifs de la Sainte-Baume et des Calanques). Cliché Bruno Arfib
*Port-Miou calanque (Cassis, SE France), where the brackish karstic submarine spring of Port-Miou discharges the groundwater recharged over several hundreds km² in carbonated Basse-Provence (Sainte-Baume and Calanque massifs).*

### Mise à disposition des données à l'ensemble de la communauté scientifique et au grand public

Plus de 18 millions de données correspondant à plus de 600 séries temporelles sont d'ores et déjà diffusées sous Licence Ouverte sur le portail des données du SNO KARST (https://data.oreme.org/observation/snokarst) dont la maintenance est assurée par l'OSU OREME (Observatoire de REcherche Méditerranéen de l'Environnement - https://oreme.org/). Cette base de données est associée à un webservice permettant d'afficher les stations dans un logiciel SIG (https://sig.oreme.org/geoserver/oreme/wfs). Le SNO KARST étant partie intégrante de l'Infrastructure de Recherche OZCAR du CNRS et d'eLTER-RI de la Commission Européenne, les données et les métadonnées produites par ses observatoires sont exportées régulièrement, au moins 1 fois par an vers le portail Theia - OZCAR (Data Terra), sur lequel elles sont visualisables. Enfin, le SNO KARST a participé à l'élaboration de la première base de données globales sur les karsts proposée par Olarinoye et *al.* [2020].

| Thématique | Type de données recueillies |
|---|---|
| climatologie / météorologie / atmosphère | précipitations, température de l'air, vitesse et direction du vent, pression atmosphérique |
| hydrologie / hydrogéologie | débit, niveau d'eau (altitude ou profondeur de la nappe), pression de l'eau |
| pédologie | température et humidité du sol |
| hydrochimie | pH, conductivité électrique, turbidité, température de l'eau, éléments majeurs et en trace (éléments traces métalliques dont Terres Rares), Matière Organique (COT/COD et fluorescence naturelle) isotopes (stables de l'eau et du carbone; isotopes du bore, strontium, lithium), gaz dissous naturels ($O_2$, $CO_2$, Radon-222) et anthropiques (CFC et $SF_6$), pesticides |
| chimie des précipitations atmosphériques | pH, conductivité électrique, matières en suspension, éléments majeurs, COD, isotopes stables de l'eau |
| microbiologie | coliformes totaux et Escherichia coli (structuration des communautés bactériennes et antibiorésistance environnementale) |
| hydrobiologie | chlorophylle, densité de cyanobactéries |

Tableau 1 : principaux éléments mesurés au niveau des sites du SNO KARST.

et du carbone, isotopes du bore, strontium, lithium, fluorescence 3D, gaz dissous naturels et anthropiques).

- Les différents compartiments du karst et l'interface entre eaux de surface et eaux souterraines (sol, pertes de rivières) font également l'objet d'une caractérisation hydrologique (débit, piézométrie), physico-chimique et biogéochimique. Ces suivis dépendent des objectifs spécifiques poursuivis sur chaque observatoire. Aujourd'hui la microbiologie et la bactériologie font aussi partie des axes de recherche en voie de développement (caractérisation des communautés bactériennes et des processus d'acquisition de l'antibiorésistance dans l'environnement).
- À l'échelle de l'hydrosystème ou à celle du site expérimental, les expériences déployées sont variées : essais hydrauliques, traçages, campagnes de mesures hydrogéophysiques (fibre optique et sismographe installés à Fourbanne, Doubs, par exemple) sont mises en place sur des durées de quelques mois maximum, là aussi en lien avec les spécificités des sites.

Certaines stations de mesure du réseau permettent l'acquisition de données au sein de conduits karstiques. Le réseau SNO KARST a ainsi développé une expertise technique pour l'acquisition de données *in situ* en milieu difficile (Lez, Fontaine de Nîmes, Port Miou, Dardennes-Ragas, Fourbanne…) ou au sein de grottes ornées paléolithiques (grotte de Lascaux en Dordogne et grotte Cosquer à Marseille).

L'acquisition régulière des données sur les 9 sites d'observations du SNO KARST est assurée par les équipes en charge de chacun des sites d'observations (tableau 1).

## III. Principaux résultats obtenus

Des groupes de travail liés aux applications méthodologiques permettent de structurer des espaces de discussions scientifiques au sein du réseau. Actuellement, ces groupes s'organisent autour des thématiques suivantes : protocoles de mesure et de calibration, traçage naturel, analyse et traitement du signal, signatures hydrologiques et physico-chimiques, modélisation pluie-niveau-débit.

Les données acquises par le SNO KARST aux exutoires et dans les différents compartiments du karst ont permis des avancées nombreuses en termes de caractérisation des mécanismes de transfert et transport d'eau et de matières, du lien entre la structure du réservoir



Photo 4 : Fontaine de Nîmes en crue le 01/10/2014. La Fontaine de Nîmes est une source karstique du sud de la France, soumise à un contexte climatique méditerranéen. Sa grande réactivité aux précipitations est à l'origine de crues éclair : si les débits d'étiage sont inférieurs à 100 l/s, les débits instantanés peuvent dépasser 17 m³/s en quelques heures. La Fontaine de Nîmes figure parmi les sources karstiques ayant le plus haut débit spécifique maximal dans le monde, estimé à 0,55 m³/s/km² en 1988. Cliché Vincent Bailly-Comte L'encadré présente une vue de la galerie principale du réseau ouest de la Fontaine de Nîmes. Cliché Franck Vasseur. La Fontaine de Nîmes est une source karstique dont le réseau spéléologique pénétrable atteint plus de 4 km. Ce réseau a fait l'objet d'opération de plongée dès 1905 par Félix Mazauric.
*Flood event at the Fontaine de Nîmes spring (10/01/2014). The Fontaine de Nîmes is a karstic spring in the South of France, subject to a Mediterranean climate. Its fast responsiveness to rainfall event can produce flash floods: if its baseflow can be lower than 100 l/s, flood flows can exceed 17 m³/s in a few hours. The Fontaine de Nîmes spring is one of the karstic springs with the highest maximum specific discharge in the world, estimated at 0.55 m3/s/km² in 1988. The box presents a view of the main gallery of the West karst network of the Fontaine de Nîmes spring. The Fontaine de Nîmes is a karstic spring whose phreatic speleological network reaches more than 4 km. Early diving took place in this karst system, with notably the first experiment of Felix Mazauric in 1905.*




Photo 5 : Carrière souterraine dans la craie de Saint-Martin-le-Nœud (Oise). Dans les parties basses, la nappe de la craie affleure, donnant naissance à des lacs souterrains ; au plafond, de l'eau de percolation s'écoule après avoir traversé la zone non saturée de la craie formant par endroits des stalactites comment illustré dans l'encadré.
Cliché Danièle Valdés
*Chalk underground quarry of Saint-Martin-le-Noeud (Oise). The water table is intercepted in the deeper parts of the quarry, in the form of underground lakes; Water coming from the unsaturated zone is percolating at the ceiling of the quarry forming stalactites as seen in the box.*

carbonaté karstique et les écoulements et des impacts des activités anthropiques et du climat et de leurs évolutions.

L'analyse conjointe de débits, pressions et des isotopes stables de la molécule d'eau a par exemple permis de quantifier les flux entre matrice et conduit et d'évaluer les facteurs de leur variabilité spatio-temporelle sur la base d'une modélisation hybride distribuée [Binet et *al.*, 2017]. La séparation des composantes lentes et rapides de l'écoulement sur la base d'approches de modélisation globale a été utilisée pour évaluer les conséquences vis-à-vis de la disponibilité de la ressource en eau pour l'AEP [Baudement et *al.*, 2017] et quantifier la dynamique des échanges entre matrice et conduits aux échelles journalières à inter-annuelles [Sivelle et Labat, 2019]. Le traçage par les éléments majeurs et COD a permis par séparation des hydrogrammes de crue de déterminer l'origine des écoulements et des matières, la contribution des différents réservoirs aux flux à l'exutoire, et une typologie des événements de crue [Ulloa-Cedamanos et *al.*, 2021]. L'impact des échanges matrice-conduits et des transferts en zone non saturée sur la dynamique des crues a pu être étudié à partir de suivis de débits et conductivité électrique dans différents compartiments du karst : pertes, endokarst et exutoire [Cholet et *al.*, 2017]. Le suivi des conductivités électriques a également pu être utilisé pour quantifier l'influence relative du karst et du ruissellement urbain dans le transport solide d'un cours d'eau de surface [Dufresne et *al.* 2020].

La fluorescence naturelle des eaux karstiques, mesurée en continu sur les sites du SNO KARST, constitue un proxy du contenu organique des eaux [Blondel et *al.*, 2012]. Ces suivis en continu ont été complétés par des campagnes de prélèvement permettant de préciser les caractéristiques spectrales des matières fluorescentes et le contenu organique associé [Erostate et *al.*, 2016 ; Durepaire et *al.*, 2014 ; Quiers et *al.*, 2014 ; Serène et *al.*, 2022]. La matière organique contenue dans les eaux karstiques peut générer des bruits de fond élevés et parasites qu'il convient de corriger dans les restitutions de traçages artificiels. Une méthode de correction a ainsi pu être proposée [Bailly-Comte et *al.*, 2018] grâce à l'expertise développée au sein du réseau. Le suivi des restitutions d'opérations de traçages artificiels réalisés sur les différents sites du SNO a permis de modéliser les Distributions de Temps de Séjour (DTS) selon différentes conditions hydrologiques [Duran et *al.*, 2016] et de proposer de nouvelles méthodes d'interprétation à base de fonction de transfert [Labat et Mangin, 2015 ; Sivelle et Labat, 2019].

Sur la base des données acquises par les différentes équipes du SNO, il a été possible de préciser les processus d'infiltration en considérant l'évolution spatiale des propriétés géochimiques des eaux souterraines [Bicalho et *al.*, 2012 ; Valdes et *al.*, 2014 ; Barhoum et *al.*., 2014]. Le rôle de la matrice poreuse dans la régulation des écoulements dans la zone non saturée, et de façon plus générale,



Photo 6 : Source du Lez et mesure du niveau d'eau dans la vasque (Hérault). La hauteur d'eau au-dessus du déversoir à seuil épais permet d'estimer le débit s'écoulant à la source. À l'arrière-plan, les calcaires aquifères du crétacé inférieur (Berriasien) affleurent du fait du décalage associé à la « faille du Lez ».
Cliché Hervé Jourde
*Lez spring and water level monitoring in the pool. The water level above the thick weir allows estimating the spring discharge. In the background, the Lower Cretaceous (Berriasian) aquiferous limestone outcrops due to the offset of the "Lez fault".*



Photo 7 : Le Trou souffleur est l'unique voie d'accès naturelle à la zone saturée de la Fontaine de Vaucluse. La descente débute par le puits des 3 Agénors (P36).
Cliché Rémi Müller, HSM
*Trou souffleur is the only cave that reaches the saturated zone of fontaine de Vaucluse hydrosystem. Descent starts with the 36 m deep "3 Agenor" shaft.*

les processus d'infiltration et de stockage de l'eau dans la zone vadose du karst ont également pu être identifiés au moyen de diverses approches hydrogéophysiques [Jardani et *al*, 2007 ; Carriere et *al.*, 2016]. Des méthodes géophysiques d'inversion ont par ailleurs été mises en œuvre pour reconstruire le champ de transmissivité du karst, et des méthodes de tomographie hydraulique ont été développées en utilisant comme support un site expérimental constitué de 21 forages recoupant l'aquifère fracturé et karstifié associé à la source du Lez [Fischer et *al.* 2017 ; Wang et *al.*, 2016].

Des études quantitatives portant sur la géométrie et la topologie de conduits karstiques 3D ont encore permis de préciser certains processus de spéléogenèse [Jouves et *al.*, 2017]. L'analyse croisée de la morphologie des réseaux et de l'organisation des écoulements dans l'endokarst a mis en évidence l'impact de la cimentation des failles sur la karstification et l'organisation des écoulements [Dal Soglio, 2019]. L'utilisation de tests hydrauliques multi-échelles spatiales et temporelles a permis d'établir le rôle prépondérant de certaines interfaces stratigraphiques sur la compartimentation d'un aquifère à l'échelle régionale [Dausse et *al.*, 2019]. Enfin, des travaux en cours de développement [Klaba et *al.*, 2021] visent à mieux contraindre les liens entre la géochimie des eaux et les différents faciès carbonatés : premier jalon vers le développement d'un traceur naturel des roches carbonatées traversées.

La thématique de l'évolution des flux d'eau et d'éléments en réponse aux changements globaux a fait l'objet de travaux moins nombreux mais largement basés sur la mise en commun des données acquises par le SNO. La réponse hydrologique de systèmes karstiques à la variabilité climatique à grande échelle a été explorée dans différents contextes à la fois karstiques et climatiques en France métropolitaine [Jourde et *al.*, 2018], suivant l'approche développée par Massei et *al.* [2017]. Les données du SNO ont également permis d'aborder le lien entre changements globaux et composition physico-chimique des eaux à l'interface entre compartiments hydrologique et hydrogéologique, et plus particulièrement l'impact des retombées atmosphériques acides et des changements climatiques sur la ressource en eau karstique [Binet et *al.*, 2020]. Une méthode de reconstitution de l'évolution

Photo 8 : Exsurgence karstique de la Hillère en crue sur le système du Baget (Ariège). Cette exsurgence ne se met en charge que lors d'épisodes de précipitations intenses soit environ 50 jours par an et constitue un phénomène tout à fait spécifique aux systèmes karstiques. Cette exsurgence est en relation avec le système annexe de la Peyrère sur lequel un pompage à haut débit avait été effectué en 1991.
Cliché David Labat
*Karstic exsurgence of the Hillère on the Baget system. This exsurgence only functions during episodes of intense precipitation (around 50 days per year) and this phenomenon is quite specific to karstic systems. This exsurgence is related to the Peyrère annex system on which high-flow pumping was carried out in 1991.*





Photo 9 : La perte du Bébec est une doline (« bétoire » dans le patois du Pays de Caux) comprenant un puits absorbant, qui draine le petit bassin versant (~8,6 km²) du ruisseau « le Bébec », situé sur le bord du plateau de la vallée de Seine entre Rouen et Le Havre. Une grande partie de l'année, l'intégralité du débit du Bébec est absorbée par la perte, qui peut déborder en hautes eaux. Cette perte est directement connectée à une source karstique localisée en pied de plateau, en bord de Seine, à 2200 m de distance. Les taux de restitution calculés suite aux très nombreux essais de traçage réalisés depuis le début des années 2000 sont toujours très élevés, entre 50 et 90 % selon les conditions hydrologiques. La source était un ancien captage d'eau potable, abandonné au milieu des années 1990 à la faveur d'un forage situé dans la plaine alluviale de la Seine, en raison de l'occurrence fréquente d'épisodes turbides de forte amplitude et des problèmes sanitaires associés.
Cliché Léa Duran

*The Bébec loss is a sinkhole including a swallow-hole which drains the small Bébec creek watershed (~8,6 km2), located on the plateaus of the Seine valley between Rouen and Le Havre. Most of the year, the entire flow of Bébec sinking creek is absorbed by the loss, which can overflow during high water periods. This loss is directly connected to a karst spring located at the foot of the plateau, on the edge of the Seine, 2200m away. The recovery rates calculated following the numerous tracing tests carried out since the beginning of the 2000s are always high, between 50 and 90% depending on the hydrological conditions. The spring was a former drinking water catchment, abandoned in the mid-90s in favor of a borehole located in the alluvial plain of the Seine, due to the frequent occurrence of turbid episodes of high amplitude and the associated sanitary issues.*

du paysage au cours des dernières décades a permis de démontrer l'impact de l'abandon des terres au profit de la recolonisation forestière sur la composition chimique de l'eau du système karstique du Baget [Ulloa-Cedamanos et *al.*, 2022].

Le développement d'une plateforme de modélisation pluie-niveau-débit dédiée aux aquifères karstiques [KarstMod, Tritz et *al.*, 2011 ; Guinot et *al.*, 2015 ; Mazzilli et *al.*, 2019] a été appuyé par les tests réalisés sur les différents sites du réseau. Cette plateforme a été utilisée en retour pour confronter le modèle conceptuel des écoulements à l'échelle des sites du réseau, à la simulation des niveaux et/ou débits [Baudement et *al.*, 2017 ; Sivelle et *al.*, 2019]. Sur le karst de la Craie par exemple, cet outil a permis de reproduire la dynamique hydrologique des différents compartiments du karst (épikarst, conduits karstiques, matrice capacitive) ainsi que la dynamique des échanges matrice-conduits. L'analyse du signal, portant sur les variables internes du modèle (niveau, flux), a mis en évidence le rôle des différents compartiments dans la transformation du signal pluie en un signal débit [Duran et *al.*, 2020]. La plateforme a également été le support de travaux réalisés par les équipes du réseau sur d'autres hydrosystèmes extérieurs au SNO KARST [Sivelle et Jourde, 2020 ; Sivelle et *al.*, 2021], ou par des équipes de recherche extérieures au réseau [Poulain et *al.*, 2018 ; Kazakis et *al.*, 2018 ; Frank et *al.*, 2020]. Des travaux récents ont par ailleurs permis de proposer des descripteurs des différents aspects de la réponse des hydrosystèmes qui soient pertinents et puissent être largement utilisés : typologie des réponses hydrodynamiques des hydrosystèmes karstiques [Cinkus et *al.*, 2021], indicateurs permettant la mise en évidence de l'importance du karst – en comparaison d'autres lithologies – sur les échanges souterrains inter-bassins [Le Mesnil et *al.*, 2020] et sur leur potentiel de laminage des crues [Le Mesnil et *al.*, 2021].

## IV. Relations entre SNO et formations universitaires

Les sites d'observations sont localisés à proximité de centres universitaires et rapidement accessibles aux étudiants et équipes enseignantes. Sites, outils et données produits dans le cadre du réseau servent donc de supports à plusieurs formations de Licence, Master et écoles d'ingénieurs.

En complément, les travaux de recherche et d'observation fournissent un cadre adéquat pour la manipulation de dispositifs de mesures (hydrométriques, hydrodynamiques, géodésiques, géophysiques…) durant les sorties ou stages de terrain. Certains enseignements de modélisation bénéficient aussi des données et/ou outils développés dans le cadre du SNO KARST. Ollivier et *al.* [2019] ont ainsi permis de développer un module de vulnérabilité PAPRIKA disponible sous QGIS. De plus, la plateforme de modélisation KarstMod est utilisée pour découvrir la démarche méthodologique de la modélisation, mais également pour sensibiliser les étudiants à la problématique des incertitudes relatives à la structure et aux paramètres d'un modèle. Des sessions de formation dédiées à la modélisation hydrologiques et à l'initiation à la plateforme de modélisation KarstMod ont d'ailleurs été assurées par différents membres du réseau à l'occasion de divers congrès internationaux (Eurokarst 2018, IAH 2019, Eurokarst 2022). Le réseau participe largement à la formation par la recherche, au travers des différents stages de Master, thèses de doctorat et post doctorats. Depuis 2017, le réseau a eu le plaisir d'accueillir au sein de ses équipes 19 étudiants en thèse et 34 étudiants en masters.

## Conclusion et perspectives

Le dispositif SNO KARST a définitivement joué un rôle structurant pour la communauté de recherche : les équipes qui le composent forment aujourd'hui un réseau dynamique sur le plan des échanges scientifiques. Les sites

d'observation, les points de suivi au sein de ces sites, la nature des observables et le parc instrumental sont adaptés à la mission fixée et se sont enrichis grâce aux expertises partagées. Les objectifs à venir concernent principalement l'harmonisation de l'instrumentation et des méthodes de mesures entre les différents sites d'observations, le développement de capteurs autonomes et à moindre coût en lien, la formalisation des pratiques de validation des données à l'échelle du réseau, l'harmonisation des pratiques de validation des données, la mise en place de procédures permettant une bancarisation plus rapide, et surtout la valorisation et la diffusion la plus large possible des données. La base de données créée et pleinement opérationnelle constitue un outil adapté pour accueillir les données d'autres partenaires.

À moyen terme, une structuration européenne s'appuyant sur les collègues suisses, allemands, espagnols, croates, slovènes, grecs avec lesquels des liens ont été tissés et perdurent à travers différents projets (tels que le projet européen PRIMA KARMA http://karma-project.org/) permettrait d'accroître le rayonnement du réseau et de proposer de nouveaux développements méthodologiques et scientifiques relatifs au fonctionnement des hydrosystèmes karstiques.

Le changement climatique constitue aujourd'hui une réalité de plus en plus tangible notamment après l'année hydrologique exceptionnelle 2022. Ribes et *al.* [2022] ont récemment démontré que les effets du réchauffement climatique pourraient même être pires que prévu sur le territoire français. Ainsi, l'eau autrefois considérée comme abondante constitue aujourd'hui une ressource que d'aucuns considèrent comme fragile et à préserver. Comme nous l'avons indiqué, une part importante des eaux souterraines qui demeurent encore aujourd'hui peu exploitées se situe dans les aquifères karstiques. Le SNO KARST par son expertise scientifique et son réseau de mesures à long terme est donc à même de répondre aux questionnements scientifiques sur l'impact de ces changements climatiques (à la fois en termes de précipitations plus intenses mais aussi de plus longues périodes sans précipitation) sur la réponse hydrologique et hydrochimique des aquifères karstiques et donc à terme sur la prévention des inondations mais aussi les possibilités d'exploitation durable de cette ressource.

## Bibliographie


**BAILLY-COMTE V., DUREPAIRE X., BATIOT-GUILHE C. et SCHNEGG P.-A., 2018** - In situ monitoring of tracer tests: how to distinguish tracer recovery from natural background. *Hydrogeol J* 26, 2057-2069. 10.1007/s10040-018-1748-8

**BARHOUM S., VALDES D., GUÉRIN R., MARLIN C., VITALE Q., BENMAMAR J. and GOMBERT P., 2014** - Spatial heterogeneity of high-resolution Chalk groundwater geochemistry - Underground quarry at Saint Martin-le-Nœud, France. *Journal of Hydrology*, 519, Part A, 756–768. 10.1016/j.jhydrol.2014.08.001

**BAUDEMENT C., ARFIB B., MAZZILLI N., JOUVES J., LAMARQUE T. and GUGLIELMI Y, 2017** - Groundwater management of a highly dynamic karst by assessing baseflow and quickflow with a rainfall-discharge model (Dardennes springs, SE France). *BSGF Earth Sciences Bulletin.* 10.1051/bsgf/2017203

**BICALHO C., BATIOT-GUILHE C., SEIDEL J.L., VAN EXTER S. and JOURDE H., 2012** - Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer, *Journal of Hydrology,* 450-451, 206-218, ISSN 0022-1694, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.059.

**BINET S., JOIGNEAUX E., PAUWELS H., ALBÉRIC P., FLÉHOC C. and BRUAND A., 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 10.1016/j.jhydrol.2016.11.042

**BINET, S., PROBST J.L., BATIOT C., SEIDEL J.L., EMBLANCH C., PEYRAUBE N., CHARLIER J.-B., BAKALOWICZ M. and PROBST A., 2020** - Global warming and acid atmospheric deposition impacts on carbonate dissolution and $CO_2$ fluxes in French karst hydrosystems: Evidence from hydrochemical monitoring in recent decades, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 270, 184-200. 10.1016/j.gca.2019.11.021

**BLONDEL T., EMBLANCH C., BATIOT-GUILHE C., DUDAL Y. and BOYER D., 2012** - Punctual and continuous estimation of transit time from dissolved organic matter fluorescence properties in karst aquifers, application to groundwaters of 'Fontaine de Vaucluse' experimental basin (SE France). *Environmental Earth Sciences*, Springer, 65 (8), pp. 2299-2309.

**CARRIÈRE S.D., CHALIKAKIS K., DANQUIGNY C. et *al.*, 2016** - The role of porous matrix in water flow regulation within a karst unsaturated zone: an integrated hydrogeophysical approach. *Hydrogeol J.* 24:7 pp 1905–1918. 10.1007/s10040-016-1425-8

**CHEN Z., AULER A. S., BAKALOWICZ M., DREW D. et *al.*, 2017** - The World Karst Aquifer Mapping project: concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeology J.*, 25, 771-785. 10.1007/s10040-016-1519-3

**CHOLET C., CHARLIER J.-B., MOUSSA R., STEINMANN M. and DENIMAL S., 2017** - Assessing lateral flows and solute transportduring 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. 10.5194/hess-21-3635-2017

**CINKUS G., MAZZILLI N. and JOURDE H., 2021** - Identification of relevant indicators for the assessment of karst systems hydrological functioning: proposal of a new classification. *Journal of Hydrology* 603, Part C, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127006.

**DAL SOGLIO L., 2019** - *Hétérogénéité géologique, spéléogenèse et hydrodynamique du karst : du concept à la modélisation numérique.* Thèse, Université d'Avignon. tel-02893236

**DAUSSE A., LÉONARDI V. and JOURDE H. 2019** - Hydraulic characterization and identification of flow-bearing structures based on multi-scale investigations applied to the Lez karst aquifer. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Elsevier, 26, pp.100627. 10.1016/j.ejrh.2019.100627

**DUFRESNE C., ARFIB B., DUCROS L., DUFFA C., GINER F. and REY V., 2020** - Karst and urban flood-induced solid discharges in Mediterranean coastal rivers: The case study of Las River (SE France). *Journal of Hydrology* Vol. 590, 125194. 10.1016/j.jhydrol.2020.125194

**DURAN L., FOURNIER M., MASSEI N. and DUPONT J.P., 2016** - Assessing the non-linearity of karst response function under variable boundary conditions. *Ground Water*, 54(1), 46-54, DOI: 10.1111/gwat.12337. 10.1111/gwat.12337

**DURAN L., MASSEI N., LECOQ N., FOURNIER M. and LABAT D., 2020** - Analyzing multi-scale hydrodynamic processes in karst with a coupled conceptual modeling and signal decomposition approach. *Journal of Hydrology*, 583, 124625. 10.1016/j.jhydrol.2020.124625

**DUREPAIRE X., BATIOT-GUILHE C., BAILLY-COMTE V. et BRUNET P., 2014** - Suivi en continu de la MOD fluorescente à l'aide d'un fluorimètre GGUN (Albillia SARL). Implication pour le suivi d'un traçage artificiel. *24e Réunion des Sciences de la Terre*, Oct, Pau, France. hal-02089979

**EROSTATE M., BAILLY-COMTE V., BATIOT-GUILHE C. and DUREPAIRE X., 2016** - Relationships between natural fluorescence and organic matter content based on sampling and in-situ monitoring of groundwater. Application to the karst systems of the Lez and Fontaine de Nîmes springs. *43rd IAH Congress*, Sept., Montpellier, France. hal-01331866/

**FISCHER P., JARDANI A., WANG X., JOURDE H. and LECOQ N., 2017** - Identifying Flow Networks in a Karstified Aquifer by Application of the Cellular Automata-based Deterministic Inversion Method (Lez Aquifer, France), *Water Resources Research*. 10.1002/2017WR020921

**FRANK S., GOEPPERT N. and GOLDSCHEIDER N., 2021** - Improved understanding of dynamic water and mass budgets of high-alpine karstsystems obtained from studying a well-defined

## Bibliographie


catchment area. *Hydrological Processes*, 35:e14033. https://doi.org/10.1002/hyp.14033

**GUINOT V., SAVÉAN M., JOURDE H. and NEPPEL L., 2015** - Conceptual rainfall–runoff model with a two-parameter, infinite characteristic time transfer function. *Hydrological Processes* Vol. 29, Issue 22, Pages 4756-4778. 10.1002/hyp.10523

**INSU, 2022** - *Les services nationaux d'observation*. https://www.insu.cnrs.fr/fr/les-services-nationaux-dobservation

**JARDANI A., REVIL A., SANTOS F., FAUCHARD C. and DUPONT J.P., 2007** - Detection of preferential infiltration pathways in sinkholes using joint inversion of self-potential and EM-34 conductivity data. *Geophysical Prospecting*, Volume 55 Issue 5, Pages 749 - 760 DOI: 10.1111/j.1365-2478.2007.00638.x

**JOURDE H., LAFARE A., MAZZILLI N., BELAUD G., NEPPEL L., DOERFLIGER N. and CERNESSON F., 2014** - Flash flood mitigation as a positive consequence of anthropogenic forcings on the groundwater resource in a karst catchment, *Environmental Earth Sciences*, 71, 573–583. 10.1007/s12665-013-2678-3

**JOURDE H., MASSEI N., MAZZILLI N., BINET S., BATIOT-GUILHE C., LABAT D., STEINMANN M., BAILLY-COMTE V., SEIDEL J.L., ARFIB B., CHARLIER J.B., GUINOT V., JARDANI A., FOURNIER M., ALIOUACHE M., BABIC M., BERTRAND C., BRUNET P., BOYER J.F., BRICQUET J.P., CAMBOULIVE T., CARRIÈRE S.D., CELLE-JEANTON H., CHALIKAKIS K., CHEN N., CHOLET C., CLAUZON V., DAL SOGLIO L., DANQUIGNY C., DÉFARGUE C., DENIMAL S., EMBLANCH C., HERNANDEZ F., GILLON M., GUTIERREZ A., HIDALGO SANCHEZ L., HERY M., HOUILLON N., JOHANNET A., JOUVES J., JOZJA N., LADOUCHE B., LEONARDI V., LORETTE G., LOUP C., MARCHAND P., MONTETY V. DE, MULLER R., OLLIVIER C., SIVELLE V., LASTENNET R., LECOQ N., MARÉCHAL J. C., PEROTIN L., PERRIN J., PETRE M.A., PEYRAUBE N., PISTRE S., PLAGNES V., PROBST A., PROBST J.L., SIMLER R., STEFANI V., VALDES-LAO D., VISEUR S. and WANG X., 2018** - SNO KARST: A French Network of Observatories for the Multidisciplinary Study of Critical Zone Processes in *Karst Watersheds and Aquifers. Vadose Zone J.* 17:180094. 10.2136/vzj2018.04.0094

**JOUVES J., VISEUR S., ARFIB B., BAUDEMENT C., CAMUS H., COLLON P. and GUGLIELMI Y., 2017** - Speleogenesis, geometry and topology of caves: a quantitative study of 3D karst conduits. *Geomorphology*, 298, 86-106. 10.1016/j.geomorph.2017.09.019

**KAZAKIS N., CHALIKAKIS K., MAZZILLI N., OLLIVIER C., MANAKOS A. and VOUDOURIS K., 2018** - Management and research strategies of karst aquifers in Greece: Literature overview and exemplification based on hydrodynamic modelling and vulnerability assessment of a strategic karst aquifer. *Science of The Total Environment* Vol. 643, Pages 592-609. 10.1016/j.scitotenv.2018.06.184

**KLABA V., CELLE-JEANTON H., CHOULET F., TRAP P., ALBARIC J., FOURNIER M., HUNEAU F. and LABBE J., 2021** - Geological and hydrogeological modelling of the Arcier karstic hydrosystem (France) - TRANSKARST Project. *AGU Fall Meeting New Orleans*, 13-17 December.

**LABAT D. and MANGIN A, 2015** - Transfer function approach for artificial tracer test interpretation in karstic system. *Journal of Hydrology* 529, 866-871. 10.1016/j.jhydrol.2015.09.011

**LABAT D., GUILLOTEAU T., LAMAGNÈRE S., DUMAREAU T, HARYOUL G., BÉRANGER S., GRANOUILLAC F. and SIVELLE, V., 2022** - New insights from an enhancement of hydrogeological archives of a French karst watershed over the last 50 years, *CR Géosciences*, in press.

**LE MESNIL M., CHARLIER J.B., MOUSSA R., CABALLERO Y. and DÖRFLIGER N., 2020** - Interbasin groundwater flow: Characterization, role of karst areas, impact on annual water balance and flood processes. *Journal of Hydrology* Vol. 585, 124583. 10.1016/j.jhydrol.2020.124583

**LE MESNIL M., MOUSSA R., CHARLIER J.-B. and CABALLERO Y., 2021** - Impact of karst areas on runoff generation, lateral flow and interbasin groundwater flow at the storm-event timescale, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 1259–1282, 10.5194/hess-25-1259-2021

**MASSEI M., DIEPPOIS B., HANNAH D.M., LAVERS D.A., FOSSA M., LAIGNEL B. and DEBRET M, 2017** - Multi-time-scale hydroclimate dynamics of a regional watershed and links to large-scale atmospheric circulation: Application to the Seine river catchment, France. *Journal of Hydrology* 546, 262-275. 10.1016/j.jhydrol.2017.01.008

**MASSEI N., LABAT D., JOURDE H., LECOQ N. and MAZZILLI N., 2018** - Réponse hydrologique de systèmes karstiques à la variabilité climatique à grande échelle pour différents bassins du Service National d'Observation KARST de l'INSU/CNRS, *Géologues*, hal-01846316

**MAZZILLI N., GUINOT V., JOURDE H., LECOQ N., LABAT D., ARFIB B., BAUDEMENT C., DANQUIGNY C., DAL SOGLIO L. and BERTIN D., 2019** - KarstMod: A modelling platform for rainfall - discharge analysis and modelling dedicated to karst systems, *Environmental Modelling & Software*. 122, 10.1016/j.envsoft.2017.03.015

**OLARINOYE T., GLEESON T., MARX V., SEEGER S., ADINEHVAND R., ALLOCCA V., ANDREO B., APAÉSTEGUI J., APOLIT C., ARFIB B., AULER A., BAILLY-COMTE V., BARBERÁ J.A., BATIOT-GUILHE C., BECHTEL T., BINET S., BITTNER D., BLATNIK M., BOLGER T., BRUNET P., CHARLIER J.-B., CHEN Z., CHIOGNA G., COXON G., VITA P. DE, DOUMMAR J., EPTING J., FLEURY P., FOURNIER M., GOLDSCHEIDER N., GUNN J., GUO F., GUYOT J.L., HOWDEN N., HUGGENBERGER P., HUNT B., JEANNIN P.-Y., JIANG G., JONES G., JOURDE H., KARMANN I., KOIT O., KORDILLA J., LABAT D., LADOUCHE B., LISO I.S., LIU Z., MARÉCHAL J.-C., MASSEI N., MAZZILLI N., MUDARRA M., PARISE M., PU J., RAVBAR N., SANCHEZ L.H., SANTO A., SAUTER M., SEIDEL J.-L., SIVELLE V., SKOGLUND R.Ø., STEVANOVIC Z., WOOD C., WORTHINGTON S. and HARTMANN A., 2020** - Global karst springs hydrograph dataset for research and management of the world's fastest-flowing groundwater. *Sci. Data 7* (1), 59. 10.1038/s41597-019-0346-5

**OLLIVIER C., LECOMTE Y., CHALIKAKIS K., MAZZILLI N., DANQUIGNY C. and EMBLANCH C., 2019** - A QGIS Plugin Based on the PaPRIKa Method for Karst Aquifer Vulnerability Mapping. *Groundwater* Volume 57, Issue 2, Pages 201-204. 10.1111/gwat.12855

**POULAIN A., WATLET A., KAUFMANN O., VAN CAMP M., JOURDE H., MAZZILLI N., ROCHEZ G., DELEU R., QUINIF Y. and HALLET V., 2018** - Assessment of groundwater recharge processes through karst vadose zone by cave percolation monitoring. *Hydrological Processes* Vol. 32, Issue13, p. 2069-2083. 10.1002/hyp.13138

**QUIERS M., BATIOT-GUILHE C., BICALHO C., PERETTE Y., SEIDEL J.L. and VAN-EXTER S., 2014** - Characterisation of rapid infiltration flows and vulnerability in karst aquifer using a decomposed fluorescence signal of dissolved organic matter. *Environ Earth Sci* 71:553-561. 10.1007/s12665-013-2731-2

**RIBES A., BOÉ J., QASMI S., DUBUISSON B., DOUVILLE H. and TERRAY L., 2022** - An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint, *Earth Syst. Dynam.*, 13, 1397–1415, https://doi.org/10.5194/esd-13-1397-2022, 2022.

**SERÈNE L., BATIOT-GUILHE C., MAZZILLI N., EMBLANCH C., BABIC M., DUPONT J., SIMLER R., BLANC M. and MASSONNAT G., 2022** - Transit Time index (TTi) as an adaptation of humification index to illustrate transit time differences in karst hydrosystems. Application to the karst springs of Fontaine de Vaucluse system (Southeastern France), *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, https://doi.org/10.5194/hess-2022-100

**SIVELLE V. and LABAT D., 2019** - Short-term variations in tracer-test responses in a highly karstified watershed. *Hydrogeol J* 27, 2061–2075. 10.1007/s10040-019-01968-3

**SIVELLE V., LABAT D., MAZZILLI N., MASSEI N. and JOURDE H., 2019** - Dynamics of the Flow Exchanges between Matrix and Conduits in Karstified Watersheds at Multiple Temporal Scales. *Water*, 11, 569. 10.3390/w11030569

**SIVELLE V., RENARD P. and LABAT D., 2020** - Coupling SKS and SWMM to Solve the Inverse Problem Based on Artificial Tracer Tests in Karstic Aquifers. *Water*, 12, 1139. 10.3390/w12041139

**SIVELLE V. and JOURDE H., 2020** - A methodology for the assessment of groundwater resource variability in karst catchments with sparse temporal measurements. *Hydrogeol J* 29 (1), 137–157. https://doi.org/10.1007/s10040-020-02239-2

**SIVELLE V., JOURDE H., BITTNER D., MAZZILLI N. and TRAMBLAY Y., 2021** - Assessment of the relative impacts of climate changes and anthropogenic forcing on spring discharge of a Mediterranean karst system, *Journal of Hydrology*, Vol. 598, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126396.

**TAYLOR R., SCANLON B., DÖLL P. et *al.*, 2013** - Ground water and climate change. *Nature Clim Change* 3, 322–329. 10.1038/nclimate1744

**TRITZ S., GUINOT V. and JOURDE H., 2011** - Modelling the behaviour of a karst system catchment using non-linear hysteretic conceptual model. *Journal of Hydrology* Vol. 397, Issues 3-4, p. 250-262. 10.1016/j.jhydrol.2010.12.001

**ULLOA-CEDAMANOS F., PROBST A., DOS-SANTOS V., CAMBOULIVE T., GRANOUILLAC F. and PROBST J. L., 2021** - Stream hydrochemical response to flood events in a multi-lithological karstic catchment from the Pyrenees Mountains (SW France). *Water*, 13, 18.

**ULLOA-CEDAMANOS F., PROBST J. L., MARAIS-SICRE C., VRECH E., MAIRE E. and PROBST A., 2022** - Potential influence of landscape transition on stream water chemistry trends during the last decades in a karst catchment (Pyrenees, SW France) in a context of global environmental changes. *Ecological Indicators*, 140, 109023

**VALDES D., DUPONT J.-P., LAIGNEL B. SLIMANI S. and DELBART C., 2014** - Infiltration processes in karstic chalk investigated through a spatial analysis of the geochemical properties of the groundwater. The effect of the superficial layer of clay-with-flints. *Journal of hydrology*, 519, Part A, 23-33. 10.1016/j.jhydrol.2014.07.002

**WANG X., JARDANI A., JOURDE H., LONERGAN L., COSGROVE J., GOSSELIN O. and MASSONNAT G., 2016** - Characterisation of the transmissivity field of a fractured and karstic aquifer, Southern France, *Advances in Water Resources*, 87, 106-121, 10.1016/j.advwatres.2015.10.014