

Le Service National d'Observation du KARST (SNO KARST)

Hervé Jourde¹, Naomi Mazzili², Nicolas Massei³, Christelle Batiot¹, David Labat⁴, Anne Probst⁵, Jean-Luc Seidel¹, Bruno Arfib⁶, Christophe Emblanch², Matthieu Fournier³, Marc Steinmann⁷, Daniel Valdes Lao⁸, Roland Lastennet⁹, Vincent Bailly Comte¹⁰, Nicolas Peyraube⁹, Jean François Boyer¹.

Les formations carbonatées karstifiées occupent des surfaces très importantes sur tous les continents, à l'affleurement comme sous couverture : 10 % des surfaces émergées mondiales, notamment en Extrême-Orient, Chine-Vietnam-Thaïlande, Amérique du Nord et Centrale, 30 à 70 % du pourtour méditerranéen, 22 % de la superficie de 18 pays européens, 33 % pour la France, et jusqu'à 67 % pour l'Estonie (Chen *et al.*, 2017). Elles recèlent une bonne part des ressources indispensables à la survie de l'homme : l'eau (25 % des ressources en eau dans le monde), les hydrocarbures (55 % des réserves de pétrole et 40 % des réserves de gaz encore non exploitées à l'échelle mondiale) et bon nombre de minerais.

Depuis plus de 50 ans, des hydrogéologues, notamment français, étudient et acquièrent des données sur différents hydrosystèmes karstiques. Ce travail d'acquisition est en général utilisé pour la caractérisation des entrées et sorties du site d'étude ou de l'un de ses sous-systèmes. De fait, si un modèle conceptuel commun incluant quatre grands sous-systèmes ou compartiments (sol, épikarst, zone d'infiltration et zone saturée) est admis, il existe peu de travaux de caractérisation ou de modélisation à vocation générique. En effet, chaque équipe développe une expertise liée à sa discipline ou spécialité et à ses sites d'étude ; de ce fait, elle peut avoir une vision partielle dépendante des caractéristiques de son site et de son objet d'étude (le paysage, la structure, le développement spéléologique, l'eau, le pétrole, le minéral) et de la méthodologie qu'elle maîtrise. La faible structuration de la communauté des hydrogéologues du karst s'est traduite par une multiplicité d'approches de modélisation conceptuelle et/ou mathématique. Parvenir à une approche plus globale des hydrosystèmes karstiques suppose de progresser dans notre appréhension de la structure du karst. Cette structure est conditionnée par des

facteurs d'ordre géologique, tectonique, morphogénétique, climatique, hydrologique, tous sujets à évolution temporelle. En résulte une hétérogénéité particulière au karst, exceptionnellement marquée, qui conditionne l'exploitation des ressources offertes par ces réservoirs.

L'un des défis majeurs de la recherche sur le karst est donc de tendre vers une nouvelle approche « synthétique » à l'échelle des grandes typologies karstiques, depuis la caractérisation de leur structure et de leur fonctionnement jusqu'à la modélisation hydrodynamique et hydrogéochimique des transferts au sein des différents compartiments. Ceci nécessite de fédérer les forces d'observation et de recherche actuelles pour comparer et unifier les approches au niveau national, puis international, tant sur les outils et les méthodes que sur les concepts. Ce constat a motivé la mise en place d'un réseau d'observation des hydrosystèmes karstiques, le SNO KARST.

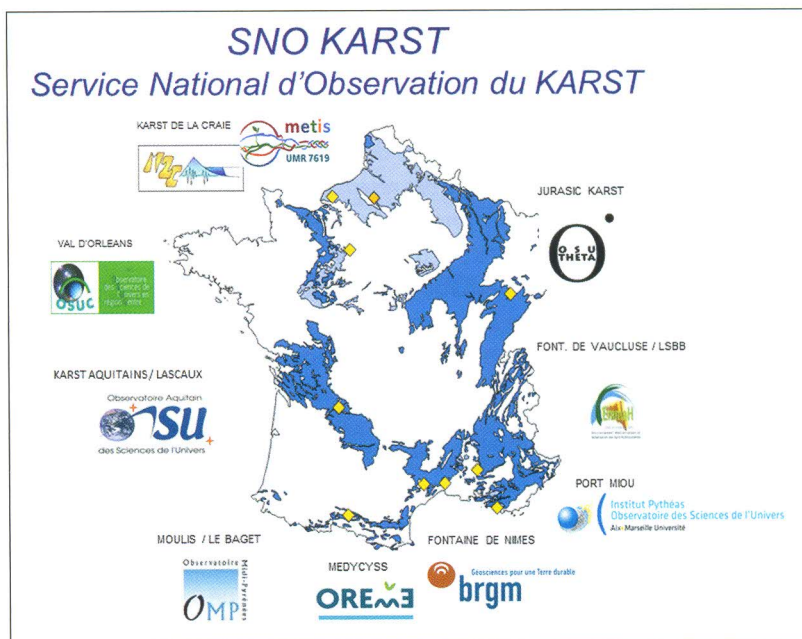


Figure 1. Localisation des différents sites d'observations du SNO KARST et organismes impliqués. Source : travail original des auteurs.

1. Hydrosclences Montpellier (HSM), Univ. Montpellier, CNRS, IRD, Montpellier, France. Courriel : herve.jourde@umontpellier.fr
2. UAPV, UMR114 EMMAH, F-84914 Avignon, France. Courriel : naomi.mazzilli@univ-avignon.fr
3. Normandie Univ, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C, 76000 Rouen, France. Courriel : nicolas.massei@univ-rouen.fr
4. Géosciences Environnement Toulouse – Université de Toulouse, Toulouse, France. Courriel : david.labat@get.omp.eu
5. EcoLab, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France. Courriel : anne.probst@ensat.fr
6. Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, Coll France, CEREGE, Aix-en-Provence, France. Courriel : arfib@cerege.fr
7. Université Bourgogne/Franche-Comté, Chrono-environnement, Besançon, France. Courriel : marc.steinmann@univ-fcomte.fr
8. UPMC Univ Paris 06, UMR 7619 METIS, 4 Place Jussieu, F-75005 Paris, France. Courriel : daniel.valdes_lao@upmc.fr
9. Université de Bordeaux, Laboratoire I2M, UMR 5295, France. Courriel : roland.lastennet@u-bordeaux.fr
10. NRE, BRGM, Univ. Montpellier, Montpellier, France. Courriel : v.bailly-comte@brgm.fr

Questionnements scientifiques et objectifs

Le SNO KARST a pour mission de rassembler les équipes du réseau autour de questions et verrous scientifiques majeurs en se basant sur le suivi de sites-ateliers qui fournissent un panel représentatif des différentes typologies d'environnements carbonatés karstiques, tant sur le plan physiographique (plaine, causse, montagne, littoral) que géologique (craie, calcaire, dolomie), dans des contextes climatiques distincts (sites en climat méditerranéen, océanique ou continental, avec ou sans régime nival) en domaine urbain, péri-urbain, ou rural (Fig. 1).

Une attention particulière est portée au lien données-modèles afin, d'une part, de mieux comprendre la physique et la chimie du milieu et, d'autre part, d'enrichir la capacité des modèles à reproduire les variations de flux et de matières. On peut également noter que les roches carbonatées qui hébergent les systèmes karstiques sont des matériaux éminemment « fragiles » à l'érosion et l'altération, et que ces mécanismes sont eux-mêmes très

conditionnés par les modifications attendues du climat, du régime hydrologique et pluviométrique. Ceci rend les karsts encore plus vulnérables sur des échelles de temps assez courtes, caractéristique en général moins prégnante dans les hydrosystèmes classiques plus profonds ou de dynamique hydrique plus lente. L'aspect transfert de matière et participation aux grands cycles biogéochimiques est également une préoccupation forte de ce SNO, et ce d'autant plus que la vulnérabilité des systèmes karstiques aux modifications des conditions aux limites en surface est forte.

Le SNO KARST aide ainsi à fédérer les forces d'observation et de recherche actuelles sur les aquifères karstiques pour comparer, mutualiser et unifier les approches (outils, méthodes, concepts). Les acteurs du SNO travaillent à développer des outils pour caractériser et modéliser l'évolution de la ressource en eau (qualitatif, quantitatif) en réponse à des forçages de courte, moyenne et grande longueur d'onde, dans des contextes physiographiques, géologiques et climatiques différents. Nous souhaitons tendre vers une approche « synthétique » à l'échelle des

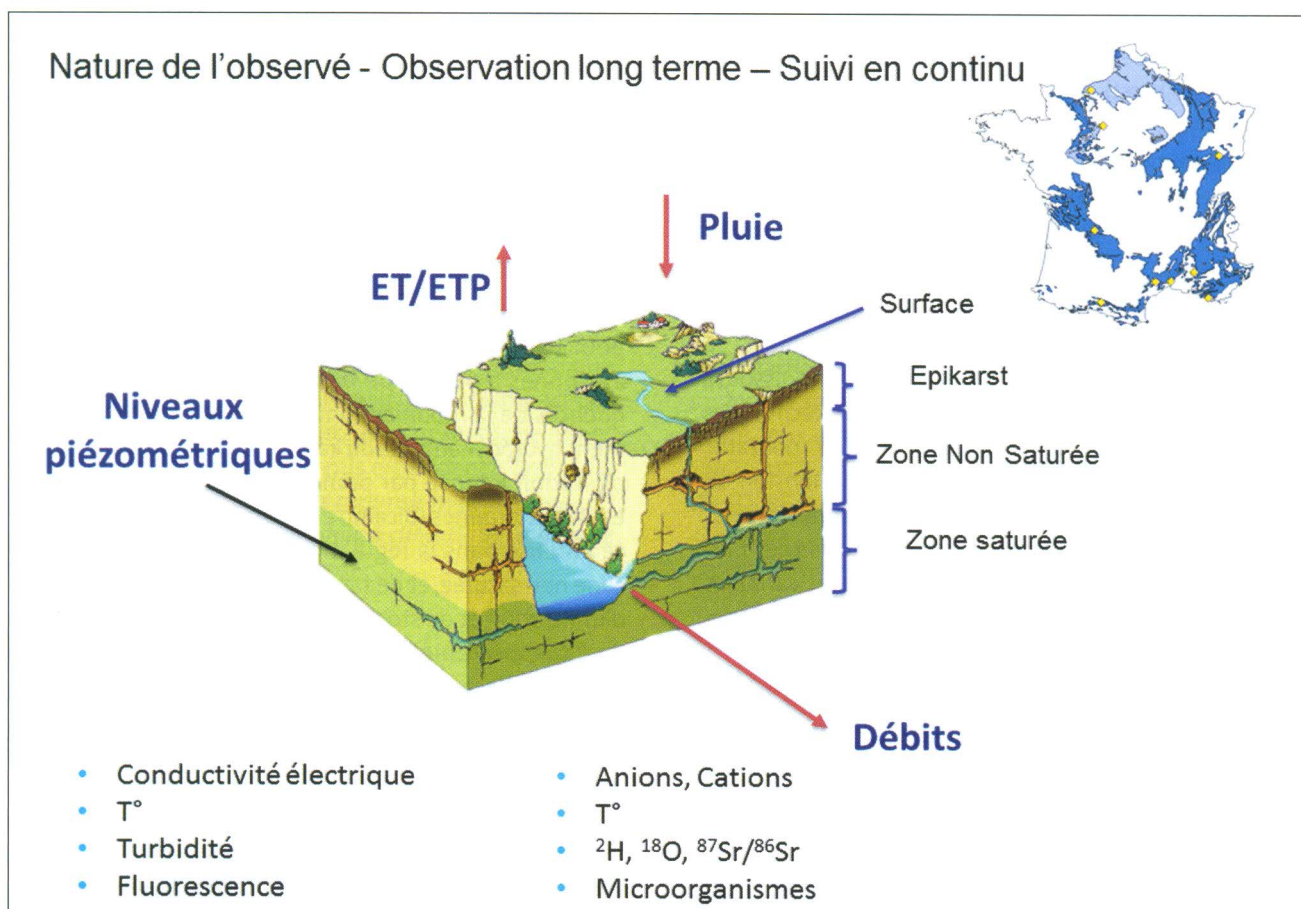


Figure 2. Variables mesurées dans les différents compartiments du karst ; chaque site d'observations offrant un regard plus spécifique sur les processus de fonctionnement dans l'épikarst, la ZNS ou la ZS. Source : modifié, d'après BRGM.

grandes typologies karstiques, depuis la caractérisation de leur structure et de leur fonctionnement jusqu'à la modélisation hydrodynamique et hydrogéochimique des transferts. Pour ce faire, il faut pérenniser une surveillance temporelle des différents laboratoires naturels.

Variables observées et base de données associée

Les mesures hydrodynamiques et physico-chimiques sont réalisées aux exutoires des hydrosystèmes karstiques (sources principales), mais également en forage et en cavités ainsi que dans les eaux de surface (Fig. 2).

Ces suivis sont complétés par des données acquises lors de campagnes géochimiques ou géophysiques qui permettent de décrire plus précisément les mécanismes caractéristiques du fonctionnement des aquifères karstiques en fonction de différents forçages (météorologiques, climatiques, anthropiques) à l'échelle du site expérimental ou encore à celle du bassin versant. Sur l'ensemble des sites, les variables suivies en continu sont les suivantes :

- variables hydrologiques et météorologiques (précipitations, températures, débits et niveaux d'eau aux exutoires karstiques ainsi que dans les différents compartiments du karst) ;
- variables physico-chimiques (conductivité électrique, température, turbidité, pH, fluorescence naturelle, Matière Organique Dissoute).

La stratégie d'observation est renforcée par i) la mesure systématique de variables géochimiques sur certains sites (ions majeurs, éléments en trace, isotopes de la molécule d'eau, pesticides et de certains éléments (C, Sr, B, Li), carbone organique total, CO₂ air et eau, gaz dissous), ii) la mise en œuvre et le développement de techniques géophysiques (résistivité électrique, potentiel spontané, RMP, gravimétrie) pour une meilleure appréhension du lien données-modèles et iii) le suivi sur certains sites des MES (matières en suspension : microgranulométrie, morphogranulométrie, observation au MEB) et des variables microbiologiques spécifiques (micro-organismes, modalités de transfert et de survie).

Les données hydrobiogéochimiques sont mesurées en sortie des systèmes karstiques au niveau des sources principalement, sur les piézomètres qui recourent l'aquifère ou encore dans la ZNS du karst dans les eaux de percolation. Les données sont acquises au pas de temps de 30 minutes afin d'enregistrer la dynamique rapide de la réponse des aquifères karstiques. Les données brutes sont ensuite archivées en interne par les différents sites d'observation du SNO Karst. Elles sont ensuite trans-

férées, en même temps que les métadonnées, sur la base de données du SNO KARST, et finalement mises à disposition de la communauté scientifique via le site du SNO KARST (www.sokarst.org).

La mise en place d'un système de reconnaissance du travail d'acquisition effectué est en cours, via un mécanisme d'identification de ressources numériques de type DOI (Digital Object identifier).

Sur la base des données acquises, il a, par exemple, été possible de caractériser l'évolution géochimique des eaux souterraines au cours de son infiltration dans la zone non saturée d'un massif karstique (Peyraube *et al.*, 2012) ou encore de mieux préciser les processus d'infiltration, en considérant l'évolution spatiale des propriétés géochimiques des eaux souterraines (Valdes *et al.*, 2014, Barhoum *et al.*, 2014). La fluorescence naturelle a été utilisée comme proxy pour décrire l'évolution du contenu organique des eaux (Blondel *et al.*, 2012). Les suivis en continu de la fluorescence 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). Ces développements permettent de décrire les processus d'infiltration rapide et de proposer de nouveaux indicateurs caractérisant la pression anthropique sur ces systèmes (Quiers *et al.*, 2013). Ces observations sur les flux de matière organique ont également permis de proposer des modèles conceptuels du transport du carbone organique dissous pour des petits systèmes karstiques (Charlier *et al.*, 2012).

Sur des aquifères de plus grande taille, exploités pour l'AEP des populations, l'existence de chroniques anciennes a permis de mettre en évidence les conséquences de la modification anthropique du fonctionnement hydrodynamique du karst (plusieurs décennies d'exploitation intense par pompage) sur l'hydrochimie des eaux souterraines (Bicalho *et al.*, 2012). Le rôle de la matrice poreuse dans la régulation des écoulements dans la zone non saturée, et de façon plus générale, les processus d'infiltration et de stockage de l'eau dans la zone vadose du karst, ont pu être identifiés au moyen de diverses approches hydrogéophysiques (Jardani *et al.*, 2007, Carrière *et al.*, 2016). Des méthodes géophysiques d'inversion ont par ailleurs été mises en œuvre pour reconstruire le champ de transmissivité du karst à partir de diverses tomographies hydrauliques réalisées dans un aquifère fracturé et karstifié, à l'échelle d'un site expérimental (Fisher, 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 spéléo-

genèse (Jouves *et al.*, 2017). Les données de traçages, acquises dans des contextes hydrologiques variés (Duran *et al.*, 2015), ont permis de modéliser les Distributions de Temps de Séjour (DTS) selon les conditions environnementales et de proposer de nouvelles méthodes d'interprétation à base de fonction de transfert (Labat et Mangin, 2015). Le comportement multifractal des flux karstiques a été mis en évidence pour des échelles de temps long (Labat *et al.*, 2012) et la sensibilité des réponses hydrologiques de certains aquifères karstiques au signal climatique régional a pu être montré (El Janyani *et al.*, 2012). L'application de modèles spécifiques ont permis de séparer les composantes lentes et rapides de l'écoulement et d'en déduire les conséquences vis-à-vis de la disponibilité de la ressource en eau pour l'AEP (Baudement *et al.*, 2017). Enfin, le rôle du karst dans les crues de surface a pu être caractérisé sur différents hydrosystèmes karstiques (Jourde *et al.*, 2007 ; Maréchal *et al.*, 2008, 2009, Bailly-Comte *et al.*, 2009, 2012), en tenant compte de l'effet des pompes AEP sur le risque d'inondation (Jourde *et al.*, 2014) ou encore des écoulements latéraux dans un système karstique dominé par un écoulement de conduit (Cholet *et al.*, 2017).

Grâce à la pertinence et la diversité des sites qui le composent, le SNO KARST a également permis **de faire émerger des avancées scientifiques**, spécifiquement en termes de modélisation des flux à l'exutoire des hydrosystèmes karstiques ; **une plateforme pour la modélisation pluie-niveau-débit, dédiée aux aquifères karstiques** (KarstMod) a ainsi été proposée (Mazzilli *et al.*, 2017 - Env. Modelling and Software et ce numéro). Les liens entre changements globaux et composition physico-chimique des eaux à l'interface entre compartiments hydrologique et hydrogéologique, et plus particulièrement l'impact des pollutions acides sur la ressource en eau karstique (Binet *et al.*, ce numéro), ont pu être mis en évidence. **Enfin, il a été possible de caractériser la réponse hydrologique de systèmes karstiques à la variabilité climatique, à grande échelle** (Massei *et al.*, ce numéro).

Maintenance des sites et liens avec les services d'observation nationaux et internationaux

Certains observatoires combinent une acquisition de données et une maintenance des sites d'observation assurées directement par les équipes de recherche impliquées dans le SNO, avec le suivi et l'exploitation de données de sites maintenus par des organismes partenaires tels que des collectivités locales et territoriales. Cette

démarche présente plusieurs intérêts : 1- elle autorise la valorisation de données acquises en-dehors de la communauté scientifique sensu-stricto, 2- elle favorise les liens entre la communauté scientifique et les acteurs opérationnels, qui participent donc eux-mêmes directement à la démarche d'observation, 3- elle permet, par les moyens déployés par les collectivités, d'accroître le rayon d'action du SNO. À titre d'exemples, les actions de surveillance de la communauté d'agglomération havraise (CODAH) pour les sources de Radicatel et le captage d'Yport en Seine-Maritime contribuent grandement à l'amélioration des connaissances sur le karst de la craie dans le cadre de l'observatoire éponyme au sein du SNO. En Périgord (SO karsts aquitains), les sources du Toulon, seules ressources de la ville de Périgueux, font l'objet d'un suivi en continu de nombreux paramètres en synergie avec l'exploitant (Suez Environnement) et la ville de Périgueux, avec des objectifs opérationnels et scientifiques pour une meilleure compréhension du fonctionnement des grands aquifères karstiques de bordure de bassin sédimentaire. Il en est de même sur d'autres sites à fort enjeux sur la ressource en eau, tels que la source du Lez ou encore la Fontaine de Nîmes, dont différents paramètres sont suivis dans le cadre du SNO KARST.

Le mode d'accès aux données, d'abord restreint aux métadonnées impliquant pour l'utilisateur potentiel de prendre contact avec l'observatoire support des données ciblées, a évolué vers un accès ouvert moyennant une inscription rapide sur le site du SNO, pour donner aux fournisseurs de données, une vision du type d'utilisateurs et de l'étendue de la diffusion des données produites. Un système de protection, pour l'accès aux données de toute ou partie de chacune des séries chronologiques, permet au fournisseur de valider et/ou de valoriser ses données avant leur diffusion à la communauté scientifique. Le SNO KARST, composante du SOERE RBV et partiellement du SOERE H+, a été de facto intégré dans la nouvelle infrastructure de recherche (IR) française pour l'observation de la zone critique OZCAR. À l'échelle internationale, l'IR OZCAR doit, à terme, constituer, avec le Réseau des Zones-Ateliers de l'Institut Écologie et Environnement du CNRS (INEE), le pendant français de l'infrastructure de recherche européenne eLTER (*European Long-Term Ecosystem Research*) en cours de construction.

Références

- Bailly-Comte V., Jourde H. et Pistre S., 2009. Conceptualization and classification of groundwater-surface water hydrodynamic interactions in karst watersheds, *Journal of Hydrology*, 376, 456-462.

- Bailly-Comte V., Borrell V., Jourde H. et Pistre S., 2012, A conceptual semidistributed model of the Coulazou River as a tool for assessing surface water-karst groundwater interactions during flood in Mediterranean ephemeral rivers, *Water Resources Research*, 48, W09534, 14 p.
- Barhoum S., Valdes D., Guérin R., Marlin C., Vitale Q., Benmamar J. et Gombert P., 2014. Spatial heterogeneity of high-resolution Chalk groundwater geochemistry - Underground quarry at Saint Martin-le-Noeud, France. *Journal of Hydrology*, 519, Part A, 756-768.
- Baudement C., Arfib B., Mazzilli N., Jouvès J., Lamarque T. et Guglielmi Y., 201 (sous presse). 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*.
- Bicalho C.C., Batiot-Guilhe C., Seidel J.L., Van-Exter S. et Jourde H., 2012. Geochemical evidence of water source characterisation and hydrodynamic responses in a karst aquifer. *J. Hydrol*, 450-451, 206-218. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.059>
- Blondel T., Emblanch C., Batiot-Guilhe C. *et al.* 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) *Environ Earth Sci* (2012) 65: 2299. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1562-x>
- Carrière S.D., Chalikakis K., Danquigny C. *et al.* The role of porous matrix in water flow regulation within a karst unsaturated zone: an integrated hydrogeophysical approach. *Hydrogeol J* (2016) 24:7 pp 1905-1918. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1425-8>
- Charlier J.-B., Bertrand C. et Mudry J. Conceptual hydrogeological model of flow and transport of dissolved organic carbon in a small Jura karst system. *Journal of Hydrology* 460-461 (2012) 52-64.
- 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.
- Cholet C., Charlier J.-B., Moussa R., Steinmann M. et 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. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3635-2017>
- Duran L., Fournier M., Massei N. et 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
- El Janyani S., Massei N., Dupont J.P., Fournier M. et Dörfliger N., 2012. Hydrological responses of the chalk aquifer to the regional climatic signal. *Journal of Hydrology*, 464, 485-493.
- Fischer P., Jardani A., Wang X., Jourde H. et 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*.
- Jardani A., Revil A., Santos F., Fauchard C. et 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.
- Jourde H., Roesch A., Guinot V., Bailly-Comte V., 2007. Dynamics and contribution of karst groundwater to surface flow during Mediterranean flood, *Environmental Geology Journal*, 51 725-730.
- Jourde H., Lafare A., Mazzilli N., Belaud G., Neppel L., Doerfliger N., 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.
- Jouvès J., Viseur S., Arfib B., Baudement C., Camus H., Collon P. et Guglielmi Y., 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>
- Labat D., Cong T.A., Mangin A., Masbou J., Tchiguirskaya Y. et Schertzer D., 2012. Multifractal behavior of long term karstic discharge fluctuations. *Hydrological Processes* doi: 10.1002/hyp.9495.
- Labat D. et Mangin A., 2015. Transfer function approach for artificial tracer test interpretation in karstic system. *Journal of Hydrology* 529, 866-871.
- Mazzilli N., V Guinot, Jourde H., Lecoq N., Labat D., Arfib B. et Baudement C., 2017. KarstMod: A modelling platform for rainfall-discharge analysis and modelling dedicated to karst systems, *Environmental Modelling & Software*.
- Maréchal J.C., Ladouche B. et Dörfliger N., 2008. Karst flash flooding in a Mediterranean karst, the example of Fontaine de Nîmes. *Engineering Geology* 99, 138-146.
- Maréchal J.C., Ladouche B. et Dörfliger N., 2009. Hydrogeological analysis of groundwater contribution to the 6-8 September 2005 flash flood in Nîmes. *La Houille Blanche* 2, 88-93. <http://dx.doi.org/10.1051/lhb:2009019>.
- Peyraube N., Lastennet R., Denis A., 2012. Geochemical evolution of groundwater in the unsaturated zone of a karstic massif, using the PCO₂-Sic relationship. *Journal of hydrology*, 10.1016/j.jhydrol.2012.01.033, 430-431, 13-24
- Quiers M., Batiot-Guilhe C., Bicalho C., Perette Y., Seidel J.L. et Van-Exter S., 2013. 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
- Valdes D., Dupont J.-P., Laignel B., Slimani S., 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.
- Wang X., Jardani A., Jourde H., Lonergan L., Cosgrove J., Gosselin O. et Massonnat G., 2015. Characterisation of the transmissivity field of a fractured and karstic aquifer, Southern France, *Advances in Water Resources*, 87 (2016) 106-121, <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.10.014>.