

BILAN DU SNO KARST – SERVICE NATIONAL D'OBSERVATION DU KARST

DOCUMENT TRANSMIS A L'OSU OREME LE 14 JUIN 2019

1- Présentation du SNO

Introduction

Le SNO KARST a pour ambition de faire émerger des questions et avancées scientifiques, spécifiquement en termes de modélisation des flux hydrogéochimiques à l'exutoire des hydrosystèmes karstiques, ou encore de liens entre changements globaux et composition physico-chimique des eaux à l'interface entre compartiments hydrologique et hydrogéologique. Une attention particulière est portée sur le 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.

Les différents sites d'observation

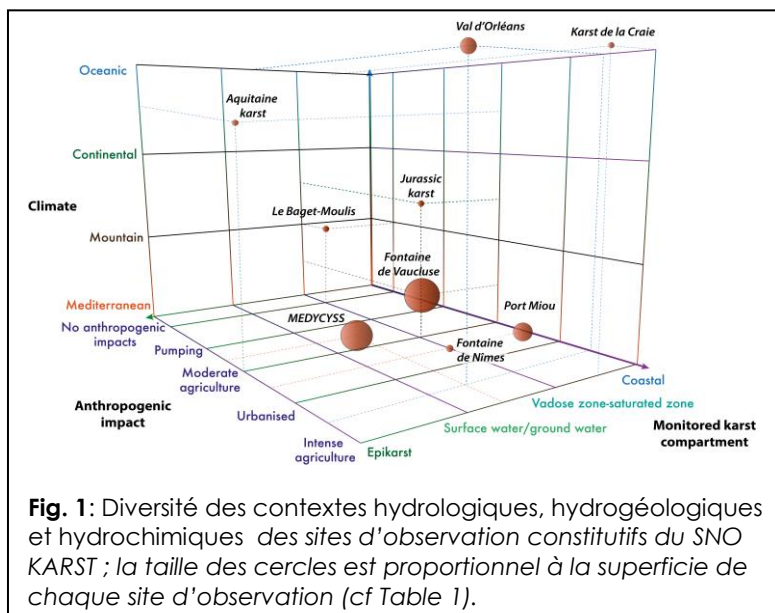


Fig. 1: Diversité des contextes hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques des sites d'observation constitutifs du SNO KARST ; la taille des cercles est proportionnel à la superficie de chaque site d'observation (cf Table 1).

L'ensemble des sites d'observation du SNO KARST (Fig. 1) constitue un panel représentatif des différentes typologies d'environnements carbonatés karstiques : sites en climat méditerranéen, océanique ou continental, avec ou sans régime nival, en domaine purement continental ou en zone littorale, comportant un épikarst très développé ou des formations de couverture non carbonatées.

De par la diversité des contextes climatiques, lithologiques, structuraux physiographiques et anthropiques, spécifique à ces sites (Fig. 1), leur étude collaborative au sein du SNO est un atout pour dégager de grands traits caractéristiques communs des environnements karstiques, notamment en termes de réponse aux changements globaux (Binet et al., 2018, Jourde et al., 2018, Massei et al., 2018). Le SNO KARST permet ainsi d'encourager cet effort au-delà des activités des unités de recherche i) par une ouverture à l'ensemble de la communauté scientifique intéressée par ces objets d'étude, et ii) par le regroupement de la communauté scientifique autour de la

problématique du suivi à long terme.

Politique scientifique

La diversité des sites-ateliers du SNO KARST et des méthodes d'analyse et de modélisation, appliquées dans le cadre d'un suivi spatiotemporel multi-échelles de l'hydrodynamique et de l'hydrochimie, ont pour objectif de permettre une meilleure caractérisation des processus physiques contrôlant les écoulements et le transport dans le but d'une meilleure compréhension et modélisation de la réponse hydrologique de ces hydrosystèmes complexes, notamment aux exutoires. Cette diversité permet de disposer de fenêtres d'observation et de mesure au niveau des différentes zones remarquables (Table 1) qui jouent un rôle essentiel dans la réponse hydrodynamique globale mesurée aux exutoires et les propriétés de transport des hydrosystèmes karstiques: sols, formations superficielles de couverture, épikarst, zone non saturée d'épaisseurs distinctes, forages dans les conduits, les fractures et au sein de blocs fissurés. Pour fournir des éléments de réponse à cette première problématique, les observations sont concentrées sur i) le comportement de la zone d'infiltration, incluant sols et/ou formations superficielles de couverture, épikarst et zone non saturée, ii) le comportement de la zone saturée et iii) La variabilité hydrologique et physico-chimique observée aux exutoires des systèmes.

Le comportement de la zone d'infiltration, incluant sols et/ou formations superficielles de couverture, épikarst et zone non saturée : La diversité offerte par les sites d'observation permet de couvrir un large panel d'environnements physiques et climatiques pour la caractérisation de l'infiltration et de la recharge des aquifères karstiques: épikarsts de montagne et méditerranéens avec sols plus ou moins développés, aquifère perché de couverture avec infiltration concentrée ou diffuse (e.g. Karst de la Craie).

Site	Location	Recharge area (km ²)	Climate	Karst network	Karst specificity	Human impact	Continuous recording
Fontaine de Vaucluse - LSBB	Avignon	1115	Mediterranean, Mountainous	800 m vadose zone + deep karst below the current base-level,	Thick unsaturated zone	Natural + agricultural land cover	Q, H, P, CE, T,
MEDYCYSS	Montpellier	>1000	Mediterranean	Multiscale monitoring network	High karst/river interactions	High pumping rate for water supply (1.1 m ³ /s)	Q, H, P, EC, T, Turb, Fluo
Val d'Orléans	Orléans	284	Continental	braided network	sinking stream in covered karst	Urban + Agricultural	Q, H, P, EC, T, Fluo
Moulis	Saint-Girons	13	Mountainous				Q, H, P, EC, T, Fluo
Chalk karst	Rouen St Martin le Noeud	10	Oceanic		sinking stream		Q, H, P, EC, T, Fluo
Jurassic karst	Besançon	30-40	Continental		1 site with sinking stream, 2 sites with diffuse infiltration	Natural + agricultural land cover	Q, H, P, EC, T, Turb, Fluo
Fontaine de Nîmes	Nîmes	55	Mediterranean		flash flood	High anthropogenic pressure (urban area)	Q, H, P, EC, T, Fluo
Port-Miou Provence	Marseille	400	Mediterranean	deep karst below the current base-level, up to 800 m vadose zone	coastal	Natural and Industrial land cover	Q, H, P, EC, T, Turb, Fluo
Karst aquitains Lascaux cave Toulon Springs	Bordeaux	< 1 100	Continental, Oceanic		Epikarst, Polyphased karst	Natural + agricultural land cover	Q, H, P, CE, T, Turb, Fluo, pH, NO ₃ ⁻ , DOC, TOC, DO.

Q: discharge, H: water level, P: rainfall, CE: electric conductivity, T: temperature, Turb: turbidity, Fluo: fluorescence ; pH: pH ; NO₃⁻: nitrate ;
DOC: dissolved organic carbon ; TOC: total organic carbon ; DO: dissolved oxygen

Le comportement de la zone saturée:
l'existence de forages pour certains sites autorise la caractérisation dynamique des écoulements dans les réseaux de conduits, de fractures, dans les blocs poreux et fissurés ainsi que l'étude de leurs interactions (e.g. Medycyss, Val d'Orléans).

La variabilité hydrologique et physico-chimique observée aux exutoires des systèmes: tous les sites font l'objet de mesures hydrologiques de base

Gouvernance

L'acquisition des données sur les différents sites du SNO KARST est assurée par plusieurs laboratoires, OSUs ou EPIC (HSM/OREME, EMMAH, ISTO/OSUC, M2C/METIS, GET/ECOLAB/OMP, CEREGE/PYTEAS, BRGM, ChronoEnvironnement, I2M/OASU). L'existence de partenariats avec les différents OS permet par ailleurs de disposer de données non acquises par les équipes du SNO.

Depuis juillet 2014 (date de labellisation par l'INSU) la coordination du SNO KARST est assurée par H. Jourde (HydroSciences Montpellier/OREME), secondé d'un.e adjoint.e (N. Massei/N. Mazzilli depuis Avril 2019) et d'un comité exécutif dont les membres actuels sont les coordinateurs des neufs SO (C. Batiot-Guilhe, N. Mazzilli, S. Binet, M. Fournier, D. Labat, B. Arfib, V. Bailly-Comte, M. Steinmann, R. Lastenet). Chaque année un workshop est organisé sur l'un des sites du SNO, rendez-vous d'échanges et de discussions scientifiques autour des données, des méthodes de traitement et des outils de modélisation développés. Tous les deux ans, un conseil scientifique réunit un comité d'expert qui évalue et analyse les développements et résultats scientifiques réalisés dans le cadre du réseau.

2- Produits et activités de la recherche du SNO KARST

Bilan scientifique

Production scientifique du réseau

77 articles parus (ACL), 12 Chapitres d'ouvrages, 95 conférences et 2 conférences Invitées dans congrès internationaux. 28 Master et 22 thèses. Participation à des Comités scientifiques et/ou organisation de sessions dans différents congrès internationaux (RST 2014, 2016 et 2017, AIH 2016, Goldschmidt 2017, Eurokarst 2012, 2014, 2016, 2018, EGU 2017, 2019, AGU 2015, 2016, 2017, 2018. 4 ATER et 3 Post-doc ont par ailleurs réalisé leur recherche en s'appuyant sur les données des différents SO.

Logiciels et bases de données.

Différents **logiciels** et **outils** ont été **développés dans le cadre du réseau**, parmi lesquels nous devons citer :

- **KarstMod**, qui correspond à une plate-forme de modélisation globale de la relation pluie-niveau-débit dans les bassins karstiques (Mazzilli et al., Environ Mod & Software, 2018). Le logiciel permet de connecter de façon modulaire plusieurs réservoirs via une interface utilisateur intuitive. Les fonctions de transfert entre réservoirs classiques des modèles réservoirs (fonctions linéaires avec ou sans seuil) peuvent être utilisées. Le logiciel intègre également des fonctions moins classiques présentant de forts effets de non-linéarité et/ou de mémoire, comme le modèle à hystérésis (Tritz et al., 2011) et le modèle à temps caractéristique infini (Guinot et al., 2015). La plateforme intègre également un ensemble d'outils permettant d'apprécier la dynamique des compartiments considérés dans le modèle et d'évaluer la qualité des résultats de modélisation. KarstMod et son guide utilisateur sont en téléchargement libre sur le site du SNO (<http://www.sokarst.org/index.asp?menu=karstmod>).

- Le **plugin PaPRIKa** pour QGIS qui permet une application pas à pas des étapes de la méthode PaPRIKa (méthode multicritère de cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques pour générer les critères de Protection (P), d'Infiltration (I), de Réservoir (R) et du degré de Karstification (Ka) ainsi que l'index de vulnérabilité obtenu par croisement de ces 4 critères. L'utilisation du plugin :

- soulage l'utilisateur de certains aspects techniques du traitement de données,
- permet une application rapide, aisée et standardisée de la méthode PaPRIKa,
- laisse l'utilisateur se concentrer sur le travail d'expertise hydrogéologique.

Le plugin PaPRIKa et son guide utilisateur sont en téléchargement libre sur le site du SNO (<http://www.sokarst.org/index.asp?menu=paprika>).

Des **campagnes expérimentales** regroupant **différentes équipes** du réseau SNO KARST ont eu lieu sur certains sites d'observation depuis 2014, notamment pour expérimenter de **nouvelles méthodes de tomographie hydraulique** en milieu hétérogène. De nombreux **échanges entre équipes** impliquées sur différents sites ont également eu lieu, notamment dans le cadre de thèses de doctorat (L. Durand, C. Beaudement, C. Olivier, G. Lorette, V. Siveyille, L. Hidalgo Sanchez) ce qui a donné lieu à diverses publications pertinentes.

De **nouvelles méthodes et techniques instrumentales** pour caractériser les **flux d'infiltration et les dynamiques de recharge**, en particulier durant les «hot moments» que sont les **événements climatiques extrêmes** ont été développés dans le cadre du réseau. Différentes sondes pour le **suivi en continu de la MON** (Matière Organique Naturelle) par fluorescence (Quiers et al., 2014, Erostate et al., AIH 2016, Bailly-Comte et al., Hydrogeol. J., 2018) ont ainsi été déployées sur différents sites d'observation (Fontaine de Nîmes, MEDYCYSS, Karst de la Craie, Jurassique Karst, Karst Aquitains).

Le SNO KARST **produit** également de nombreuses **données hydrométéorologiques, hydrologiques, hydrodynamiques et hydrogéochimiques** accessibles via le site OSU OREME et THEIA (<https://data.oreme.org/observation/snokarst>). Étant partie intégrante d'**OZCAR** et d'**eLTER** les données des différents sites sont également accessibles dans la **base de données DEIMs**, utilisée comme base de connaissance des **observations/sites disponibles dans eLTER** (<https://deims.org/>) sous le référencement OZCAR-RI_ SNO KARST / nom du Site.

Faits marquants

Le SNO KARST fait l'objet d'un **article dans un numéro spécial de Vadose Zone Journal** : SNO KARST: a French network of observatories for the multidisciplinary study of critical zone processes in karst watersheds and aquifers (Jourde et al., 2019) <https://dx.doi.org/10.2136/vzj2018.04.0094> ainsi que de quatre articles dans le numéro spécial Observatoires de la revue Géologues (Binet et al., 2018, Jourde et al., 2018, Massei et al., 2018 ; Mazzilli et al., 2018). La plateforme de modélisation KarstMod, développée dans le cadre du réseau, a également fait l'objet d'une publication à **Environ Mod & Software** (Mazzilli et al., 2018).

Du fait de la quantité et de la qualité des données acquises dans le cadre du réseau, le SNO KARST a été **sollicité** par des **chercheurs des Universités de Freiburg** (Allemagne) et de **Bristol** (Angleterre) pour contribuer à une **base de données internationale** regroupant des chroniques hydrométéorologiques sur plus de 200 sources karstiques. Ce travail fait l'objet d'une publication intitulée **World Karst Spring Hydrograph (WoKaSH) database for research and management of the world's fastest-flowing groundwater** qui sera soumise (Juin 2019) à **Nature Scientific Data**.

Des membres du SNO (N. Mazzilli, B. Arfib et C. Ollivier) ont animé une journée de **formation aux outils et logiciels développés par le SNO KARST** au cours de la **conférence internationale EUROKARST** (Juillet 2018, Besançon, France), avec deux ateliers : (1) PaPRIKa, a multi-criteria method for vulnerability mapping of karst aquifers, (2) KarstMod, an adjustable platform for hydrodynamic modeling in karst aquifers. Une **conférence invitée** (Keynote speaker) a également été donnée pour présenter l'activité du réseau à la communauté internationale travaillant sur le karst.

Dans le cadre du **congrès AIH** (Malaga, 2019) et du cours international **Hidrokarst** (<http://cehuma.uma.es/en/hidrokarst.asp>, le coordinateur du réseau (H. Jourde) animera une session sur la modélisation numérique dédiée à l'hydrologie karstique. Il donnera également une conférence en tant que **keynote speaker** intitulée **Karst functioning: What do we learn from the various modeling methods ?**

Chaque année, le SNO KARST réalise un **workshop** ouvert aux permanents (EC, C, IATS) et étudiants (Master, doc, post docs) impliqués dans les différents sites d'observation. Ce workshop est l'occasion d'aborder **différentes thématiques de recherche**, de former à l'utilisation de certains **outils et logiciels**, ainsi que d'échanger sur les **objectifs scientifiques** de certains projets de façon informelle.

Fort de cette expertise sur la modélisation du karst, différents membres du SNO KARST ont été sollicités pour participer à l'appel à projet PRIMA (Projet Européen). Ce **projet Européen PRIMA**, intitulé **KARMA** (Karst Aquifer Resources availability and quality in the Mediterranean Area, 2019-2022) au sein duquel nous portons le **WP Modelling tools**, a été **accepté** et débutera en **Septembre 2019**. Ce projet permettra de **renforcer des liens existants à l'international** entre les différents membres du SNO KARST et les équipes du KIT (Karlsruhe institute of Technology, Allemagne), l'AUB (American University of Beirut, Liban) et de l'UMA (University of Malaga, Espagne). Il permettra par ailleurs de **s'ouvrir à de nouvelles collaborations** avec le BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Allemagne), l'URO (University of Rome, Italie) et l'ENIT (Ecole National d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie).

La reconnaissance de l'expertise et des savoir-faire du SNO s'est également traduite par la signature de différents **accords de collaboration avec des universités étrangères** pour favoriser l'**accueil et l'échanges d'étudiants et chercheurs/enseignant chercheurs** avec ces universités. Ces collaborations ont permis le développement de **projets communs** qui se sont traduits par la mise en place d'une thèse de doctorat et l'accueil de chercheurs et étudiants de la **China University of Petroleum** (UPC/RCOGR, Chine) ainsi que de l'**Universidad Nacional Toribio Rodríguez De Mendoza De Amazonas** (UNTRM, Pérou).

Le SNO KARST et la formation

Pour les différents sites d'observations du réseau, les **dispositifs expérimentaux** ainsi que l'ensemble des **données produites** sont régulièrement utilisés dans le cadre d'**enseignement en Licence, Master et école d'ingénieurs**. Ces sites d'observations permettent ainsi la **mise en œuvre in situ des enseignements théoriques** dispensés en salle, ou encore de **manipuler différents dispositifs de mesures** (hydrométriques, hydrodynamiques, géodésiques, géophysiques, ...). Le réseau participé également largement à la **formation par la recherche**, au travers des différents stages de Master, thèses de doctorats et post doctorats.

Références du SNO KARST consultables à l'adresse suivante.

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1yaJYHH82WO_1NKuoVkJ62kr2cZV6_nAINMEp9JwKIY/edit#gid=1297614481