



HAL
open science

Observation et Modélisation en Hydrogéologie Karstique

Naomi Mazzilli

► **To cite this version:**

Naomi Mazzilli. Observation et Modélisation en Hydrogéologie Karstique. Interfaces continentales, environnement. Avignon Université, 2024. tel-04353931v1

HAL Id: tel-04353931

<https://hal.science/tel-04353931v1>

Submitted on 22 Dec 2023 (v1), last revised 1 Mar 2024 (v2)

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.

Copyright



HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

ÉCOLE DOCTORALE 536 - AGROSCIENCES ET SCIENCES
SPÉCIALITÉ HYDROGÉOLOGIE

Observation et Modélisation en hydrogéologie karstique

Naomi Mazzilli

Soutenue le 10 février 2023 devant le jury composé de :

Catherine Bertrand	PR, Université de Franche Comté	Présidente du jury, examinatrice
Nico Goldscheider	PR, Karlsruhe Institute of Technology	Rapporteur
Roger Guérin	PR, Université Pierre et Marie Curie	Rapporteur
Roger Moussa	DR, INRAE	Rapporteur
Albert Oliosio	DR, INRAE	Examineur

Table des matières

I	CV détaillé	3
1.1	Informations administratives	4
1.2	Cursus et parcours professionnel	4
1.3	Activité scientifique	5
1.3.1	Encadrement doctoral et scientifique	5
1.3.2	Valorisation des travaux de recherche	5
1.3.3	Responsabilité de projets de recherche publics et industriels	5
1.3.4	Missions d'observation et responsabilités collectives au sein des SNO	5
1.3.5	Animation de la recherche	5
1.3.6	Expertises hydrogéologiques et évaluations de projets	6
1.4	Activité d'enseignement, responsabilités pédagogiques et vulgarisation	6
1.4.1	Activités d'enseignement	6
1.4.2	Responsabilités pédagogiques	7
1.4.3	Activités de vulgarisation scientifique	7
1.5	Encadrement doctoral et scientifique	7
1.6	Projets de recherche	11
1.6.1	Projets nationaux	11
1.6.2	Projets internationaux	11
1.6.3	Collaborations industrielles	11
II	Activités de recherche	13
2	Introduction	15
2.1	Parcours personnel	15
2.2	Contexte	15
2.2.1	De l'hydrosphère aux aquifères carbonatés	15
	Place des eaux souterraines dans l'hydrosphère	15
	Place des aquifères carbonatés dans la ressource en eau souterraine	16
2.2.2	L'aquifère carbonaté karstique	16
	Définition	16
	Spécificité d'hétérogénéité	16
	Spécificité de fonctionnement hydrodynamique	17
	Risques et enjeux	17
2.3	Positionnement scientifique	20
3	Présentation des travaux	21
3.1	Approches basées sur la modélisation	21
3.1.1	Modèles hydrogéologiques : le cas du karst	21
3.1.2	Contribution à la modélisation réservoir	22
	Contexte : modélisation réservoir	22
	Travaux	22
3.1.3	Apport aux bonnes pratiques de modélisation	24
	Contexte	24
	Travaux : influence de la structure d'un modèle réservoir sur le comportement du biais d'initialisation	24
	Travaux : impact des mécanismes de compensation des erreurs sur le processus de calibration	26
3.1.4	Diffusion des bonnes pratiques et de l'approche de modélisation	28
	Contexte	28
	Travaux : présentation de la plateforme KarstMod	28
3.1.5	Bilan de l'approche modélisation réservoir	30
3.2	Approches basées sur l'observation	32
3.2.1	Démarche d'observatoire	32
	Contexte : motivation de la démarche	32
	Contexte : présentation de l'hydrosystème de fontaine de Vaucluse - LSBB	32

	Travaux : apport au dispositif existant	33
3.2.2	Quantification des stocks	36
	Contexte	36
	Travaux : Variabilité des teneurs en eau RMP dans différents faciès carbonatés	36
	Travaux : Variabilité temporelle des teneurs en eau RMP	37
3.2.3	Traçage artificiel	40
	Contexte	40
	Travaux	40
3.2.4	Traçage naturel	43
	Contexte	43
	Travaux : Utilisation de la matière organique naturelle comme traceur naturel des courts temps de séjour	43
3.2.5	Bilan des approches basées sur l'observation	45
4	Projet	46
4.1	Caractérisation et modélisation des écoulements en ZNS des aquifères carbonatés	46
4.2	Caractérisation et modélisation de l'impact de l'évolution du couvert végétal sur l'évolution de la ressource en eau souterraine	49
A	Bibliographie	51
A.1	Contributions	51
A.1.1	ACL - (Articles à comité de lecture - Rang A)	51
A.1.2	ACLN - Publications dans des revues à comité de lecture non répertoriées dans les bases internationales	53
A.1.3	C-ACTI - Communications avec actes dans un congrès international	53
A.1.4	C-COM - Communications orales sans actes dans un congrès national ou international	54
A.1.5	COS - Chapitres d'ouvrage scientifique (incl. book of proceedings)	55
A.1.6	AP - Autres productions	55
A.2	Autres références	56

Première partie

CV détaillé

Deuxième partie

Activités de recherche

Dans ce qui suit et afin de faciliter l'appréciation de ma contribution les références aux travaux auxquels j'ai participé apparaissent en **bleu**, tandis que les références à des travaux auxquels je n'ai participé figurent en **marron**.

Chapitre 2

Introduction

2.1 Parcours personnel

A l'issue d'une classe préparatoire "Physique - Chimie" j'ai intégré l'ENS Paris (maintenant ENS - PSL) où j'ai choisi de poursuivre mes études au sein du département "Terre - Atmosphère - Océan" (maintenant département de Géosciences) : bifurcation thématique, mais pour une formation à l'approche très basée sur la physique. J'ai choisi pour ma dernière année d'études le DEA "Sciences de l'Eau dans l'Environnement continental", nouvelle bifurcation vers une enveloppe fluide absente de mon cursus antérieur et que je souhaitais mieux connaître. A l'issue du DEA, j'ai travaillé 2 ans pour un bureau d'études dans le cadre d'un projet de valorisation de la recherche portant sur la modélisation stochastique d'épisodes pluvieux convectifs. J'ai ensuite plongé dans les eaux souterraines karstiques au cours de ma thèse de doctorat. Parallèlement, j'ai découvert ce milieu par l'exploration spéléologique. Bien que les approches que j'ai utilisées ou développées n'y soient pas spécifiques, le karst constitue le support principal des travaux de recherche que j'ai pu mener depuis lors. Depuis 2012, j'effectue mes recherches au sein de l'UMR EMMAH (Avignon Université et INRAe).

2.2 Contexte

2.2.1 De l'hydrosphère aux aquifères carbonatés

Place des eaux souterraines dans l'hydrosphère

Le réservoir d'eau douce le plus utilisé à l'échelle globale, tous usages confondus, sont les eaux de surface : faciles à prélever, elles sont aussi la ressource la plus abondante en termes de flux¹. Les eaux souterraines constituent cependant le plus grand réservoir en termes de stock² (ALLEY et al., 2002). Par rapport aux eaux de surface, elles bénéficient d'une meilleure qualité sanitaire, d'une plus large disponibilité spatiale (et donc disponibilité aux humains et aux écosystèmes), ainsi que d'une variabilité temporelle réduite. Elles fournissent ainsi plus de la moitié des volumes mondialement distribués pour l'AEP et environ 25 % des volumes distribués à des fins d'irrigation, alimentant ainsi 38 % des terres irriguées (UNITED NATIONS ORGANIZATION, 2022).

L'ensemble des compartiments de l'hydrosphère sont en interaction complexe entre eux, et avec la biosphère. Par exemple, les eaux souterraines soutiennent généralement l'étiage des cours d'eau ; la déplétion des aquifères contribue de façon significative à l'augmentation du niveau de la mer (VEIT et CONRAD, p. d.) ; via les sols, les eaux souterraines influencent l'évapotranspiration ainsi que la température moyenne de surface et les précipitations (F. WANG et al., 2018). La définition des écosystèmes en lien avec les eaux souterraines tient compte de ces interactions : sont ainsi reconnus comme hébergeant probablement des espèces dépendantes des eaux souterraines les zones humides en lien avec une nappe peu profonde, ou les estuaires alimentés par des rivières soutenues par les aquifères (EAMUS et al., 2016). Ces écosystèmes jouent en retour un rôle critique dans la recharge des aquifères et leur protection des aquifères vis à vis des contaminants.

"Les eaux souterraines : rendre visible l'invisible" était le thème retenu pour l'édition 2022 de la Journée mondiale de l'eau. En France, le manque d'attention porté aux eaux souterraines dépasse le grand public et concerne également les acteurs supposés participer à leur gestion (RINAUDO et al., 2020). Les enjeux sont pourtant colossaux. L'épuisement des ressources souterraines est un problème global qualifié de bombe à retardement pour la sécurité alimentaire mondiale (BIERKENS et WADA, 2019). De façon indirecte, la déplétion des aquifères peut engendrer une diminution des écoulements de surface, accroître les problèmes de subsidence, favoriser les intrusions salines en zone côtière. Elle est ainsi généralement associée à un risque de dégradation de la qualité des eaux souterraines et des écosystèmes. La contamination des eaux souterraines est également un enjeu à l'échelle du globe. Les substances polluantes et les processus de contamination sont très variés et peuvent poser des risques sérieux de santé publique via la consommation directe des eaux contaminées ou la chaîne alimentaire (BURRI et al., 2019). La gestion soutenable des ressources en eau doit ainsi intégrer l'ensemble des facteurs de vulnérabilité anthropique et environnementale (Figure 2.1).

1. à l'échelle globale la ressource renouvelable en eaux de surface est de l'ordre de 3 fois celle des eaux souterraines (DÖLL et FIEDLER, 2008)

2. le premier si on considère la croûte continentale jusqu'à 10 km de profondeur (FERGUSON et al., 2021)



FIGURE 2.1 – Les différentes dimensions de vulnérabilité anthropique et environnementale liées à l'exploitation et la contamination des eaux souterraines. D'après GORELICK et ZHENG, 2015.

Place des aquifères carbonatés dans la ressource en eau souterraine

Les formations carbonatées affleurent sur environ 15 % des surfaces émergées mondiales (GOLDSCHIEDER, CHEN et al., 2020) et sont par ailleurs largement représentées dans le sous-sol (CHEN et al., 2017). De façon cohérente avec leur proportion de présence à l'affleurement, elles fournissent environ 13% des eaux souterraines utilisées pour l'AEP (desserte d'environ 9% de la population mondiale) (STEVANOVIC, 2017). Ces chiffres sont associés à une large incertitude et masquent une grande disparité de situations liée à la disparité des situations géologiques (A. HARTMANN, GOLDSCHIEDER et al., 2014). En Europe par exemple, où la surface relative couverte par les carbonates est la plus importante (~22%, GOLDSCHIEDER, CHEN et al., 2020), les populations de nombreuses zones densément peuplées dépendent de leurs ressources aquifères, en particulier en Angleterre, dans le Sud et Nord de la France, au centre de l'Italie, à l'Est de l'Espagne (PARISE et al., 2018). Symbole de cette importance, 5 capitales européennes (Rome, Sarajevo, Tirana, Skopje, Podgorica) utilisent des sources karstiques pour leur approvisionnement en eau potable (PARISE et al., 2018).

2.2.2 L'aquifère carbonaté karstique

Définition

Dans ce document les aquifères karstiques sont réduits aux seuls aquifères carbonatés. Les karsts peuvent cependant se développer d'autres contextes. Dans les roches évaporitiques la cinétique de dissolution est plus rapide, et les modèles spéléogénétiques et d'écoulement peuvent plus difficilement être découplés. Des modèles karstiques sont également associés à la quartzite malgré une cinétique de dissolution beaucoup plus lente (PICCINI et MECCHIA, 2009; WRAY, 1997).

Spécificité d'hétérogénéité

Les aquifères karstiques sont caractérisés par un fort degré d'hétérogénéité³ qui se déploie sur une large gamme d'échelles spatiales et résulte de processus de différentes natures, aboutissant à une organisation spatiale complexe. L'hétérogénéité du karst débute par celle des sédiments initiaux : la précipitation des carbonates⁴ se fait sous des conditions écologiques et environnementales ou physico-chimiques particulières. Processus et environnements de dépôt varient ainsi latéralement (évolution dans l'espace à un temps donné, Figure 2.2) et verticalement (évolution dans le temps). Les carbonates sont très réactifs chimiquement⁵. Minéralogie, porosité et perméabilité évoluent donc dès les premières phases de la diagenèse : ces modifications impactent les circulations de fluides et donc la diagenèse subséquente, ainsi que les propriétés mécaniques et donc la déformation et la fracturation, qui à leur tour influencent les écoulements. L'hétérogénéité du réservoir karstique résulte ainsi de la convolution d'hétérogénéités acquises à différentes périodes et selon différents mécanismes.

Parmi les nombreux exemples de cette intrication, deux sont fournis ici. Le premier provient d'une étude récente de l'urgonien des monts de Vaucluse (COCHARD, LÉONIDE, BORGOMANO, GUGLIELMI, MASSONNAT, J. ROLANDO et al., 2021; LÉONIDE et al., 2014). Les roches microporeuses y sont localisées en milieu des séquences de dépôt subtidal et encadrées par des roches cimentées en bas et haut de séquence. Cette cimentation est une caractéristique acquise très précocement et est associée à une déformation cassante plus marquée que dans les roches microporeuses. Le caractère cimenté et cassant a limité par la suite la circulation des eaux météoritiques dans les dépôts de bas et haut de séquence, tandis que cette

3. le karst a pu être défini comme "le milieu où l'hétérogénéité atteint son paroxysme" (MARSILY, 1981)

4. elle peut être d'origine biochimique ou chimique

5. c'est une spécificité qui les distingue des roches silicatées

circulation a permis la préservation et l'augmentation de la microporosité des roches de milieu de séquence. Le second exemple est emblématique du karst : il s'agit de l'étroite dépendance de l'organisation et la morphologie du réseau karstique aux propriétés hydrodynamiques et aux caractéristiques de l'écoulement. L'élargissement des vides par dissolution favorise l'écoulement dans ces mêmes vides ; cette rétroaction positive est à l'origine de la hiérarchisation du réseau karstique. Une illustration de l'influence de paramètres tels que le type de recharge, la position du niveau de base, le gradient hydraulique ou la nature du solvant sur cette organisation et les morphologies endokarstiques est proposée par JOUVES et al., 2017 (cf Figure 2.3) : le réseau karstique est ainsi modelé par les circulations souterraines qu'il conditionne à son tour. Les propriétés hydrodynamiques modulent ce schéma d'ensemble, par exemple avec une karstification préférentielle le long d'horizons possédant des caractéristiques plus favorables à la karstification que la roche environnante (horizons d'inception, LOWE et GUNN, 1992), des fractures ouvertes ou de conduits pré-existants. Les failles sont également des facteurs majeurs de la structuration du réseau karstique. Objets hétérogènes⁶ dont les caractéristiques peuvent évoluer spatialement, elles ont un impact significatif sur les écoulements et la structuration du réseau karstique à l'échelle de l'aquifère, y compris dans leur rôle de barrière (CELICO et al., 2006, DAL SOGLIO, 2019). Précipitation biologique des carbonates et dissolution par l'eau acidifiée par le CO₂ biogénique étant les mécanismes dominants de production et karstogénèse, une dernière caractéristique de l'hétérogénéité des karsts est son intrinsèque lien au vivant⁷.

Spécificité de fonctionnement hydrodynamique

L'hétérogénéité des karsts induit un fonctionnement hydrodynamique spécifique, qui peut être résumé par les termes de dualité et non-linéarité.

La dualité trouve son origine dans l'hétérogénéité du réseau poreux. La complexité de celui-ci peut être décrite par un continuum en trois pôles de porosité matricielle stricto sensu, porosité de fissures et fractures finement ouvertes, porosité de fractures élargies par dissolution et réseau karstique (Figure 2.5). Du point de vue hydrodynamique et à l'échelle de l'hydrosystème, le fonctionnement des volumes poreux matriciels et fissurés est similaire et difficile à discriminer : ils accueillent des écoulements laminaires relativement lents. Au sein du réseau karstique les écoulements peuvent être turbulents et sont relativement rapides par rapport aux précédents. Matrice poreuse et fissures constituent donc la "matrice" au sens des hydrogéologues, sont opposés aux "conduits" et constituent la base de la dualité de fonctionnement hydrodynamique des karsts.

Cette dualité se retrouve dans les processus d'infiltration, écoulement dans l'hydrosystème et à son exutoire (KIRALY, 1998) : i) une infiltration lente et diffuse recharge la matrice tandis qu'une infiltration rapide et concentrée recharge les conduits, ii) des écoulements lents dans la matrice s'opposent aux écoulements rapides dans les conduits, iii) les débits d'étiage sont soutenus par les écoulements matriciels tandis que le drainage du réseau karstique est dominant dans les débits de crue fortement variables.

La non-linéarité⁸ a de multiples origines liées notamment à l'existence de seuils de fonctionnements : à l'échelle du conduit avec la transition entre écoulement à surface libre ou en charge ou les interactions entre matrice et conduit, à l'échelle du réseau karstique avec la mise en fonctionnement de trop-pleins, pertes ou l'évolution des conditions aux limites (A. HARTMANN, GOLDSCHIEDER et al., 2014 et Figure 2.4).

Risques et enjeux

Les spécificités de fonctionnement hydrodynamique des aquifères karstiques sont associées à un type de crue éclair reconnue comme spécifique (BONACCI et al., 2006). La possibilité d'infiltration et de transit rapides via les conduits karstiques est associée à une vulnérabilité élevée de la partie la plus transmissive du système : cette vulnérabilité est donc très hétérogène dans l'espace et associée à un aléa variant fortement dans le temps⁹. Le réseau de vide karstiques permet une forte mobilité des sédiments. L'occurrence d'un transport de masse lent dans les zones moins connectées et les processus d'absorption - désorption induit par ailleurs des processus de stockage et relarguage à plus long terme (PADILLA et VESPER, 2018). Du point de vue géotechnique, la présence de cavités karstiques, mêmes si on peut les considérer comme très peu évolutives à l'échelle humaine, est associée à un risque d'effondrement qui peut être accru par les activités anthropiques et en particulier celles amenant à une modification significative de la charge hydraulique (GUTIERREZ et al., 2014 ; MILANOVIC, 2018).

En sus des ressources en eau, les formations karstiques recèlent également de nombreux minerais (BOSÁK, 1989 ; FILIPPOV, 2004) tandis que plus de 60% des réserves de pétrole et 40 % des réserves de gaz se situeraient dans des réservoirs carbonatés (AKBAR et al., 2000). Ils sont également une source d'énergie hydroélectrique.

6. par exemple le coeur d'une faille est considéré comme généralement moins perméable que l'encaissant du fait du comblement des fractures par de petits éléments et de leur re-cimentation, au contraire de la zone d'endommagement considérée comme généralement plus perméable que l'encaissant (WIBBERLEY et al., 2008)

7. de façon anecdotique, la corrosion d'origine biogénique associée à la présence de colonies de chauves souris peut induire des modifications morphologiques localement significatives : un doublement de la section de galerie est ainsi rapporté dans BARRIQUAND et al., 2021.

8. parfois l'hystérèse

9. et globalement plus élevée que celle d'aquifères de types poreux. Par exemple une analyse de la littérature a montré que les contaminants organiques émergents sont plus fréquemment détectés dans les karsts que dans les autres principaux types d'aquifères. Ils sont moins fréquents en revanche que dans les eaux de surfaces et aquifères libres peu profonds (LUKAC REBERSKI et al., 2022).

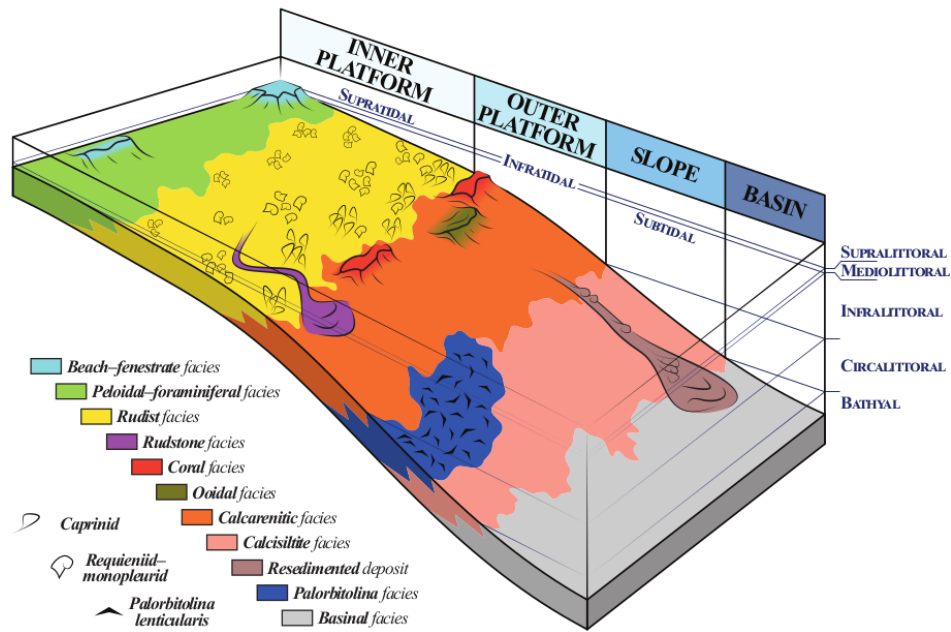


FIGURE 2.2 – Reconstruction schématique et zonation des faciès/environnements de dépôts de la plate-forme urgonienne Provençale (adapté de citepOthersbrownMASSE2011659 par TENDIL, 2018).

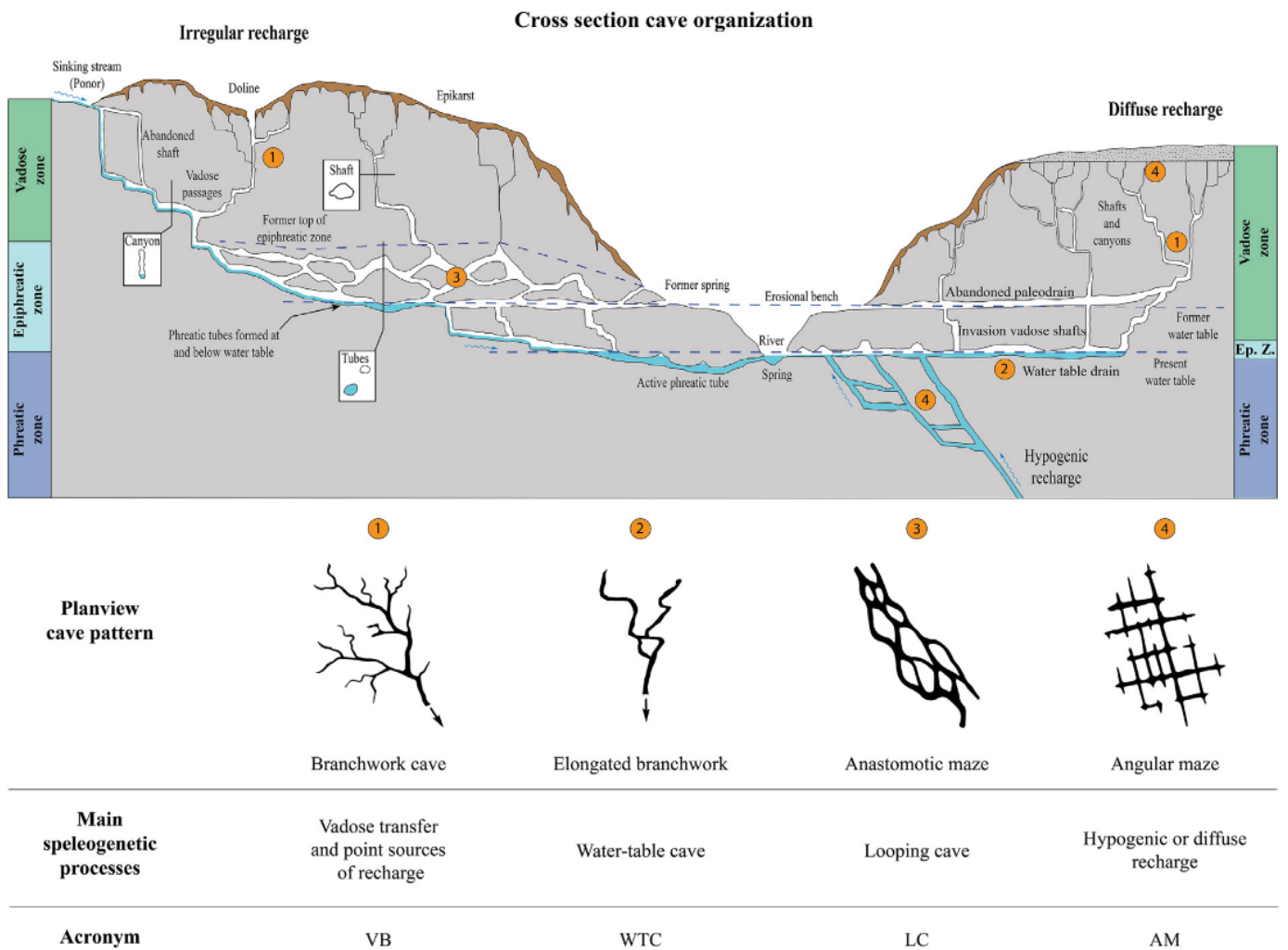


FIGURE 2.3 – Coupe idéalisée d'un système karstique faisant apparaître sa zonation verticale et l'organisation type du réseau en 2D. La recharge peut être épigénique (avec une infiltration diffuse ou concentrée) ou hypogénique. (JOUVES et al., 2017), modifié d'après AUDRA et PALMER, 2013 ; PALMER, 1991

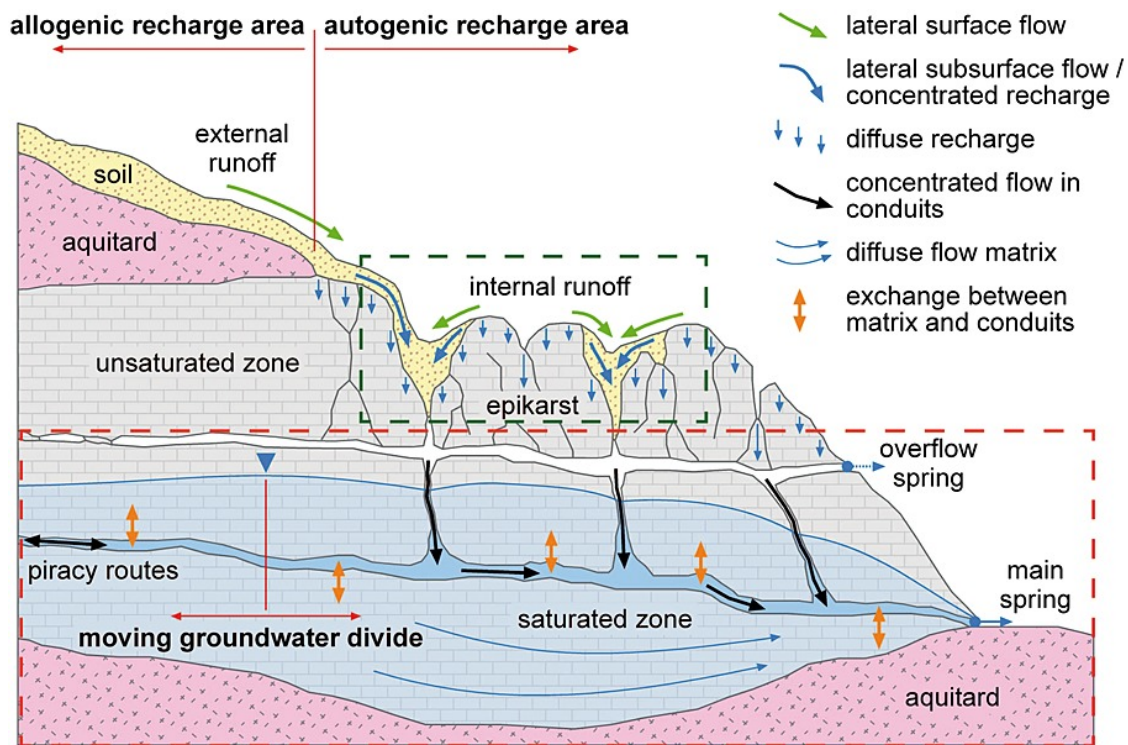


FIGURE 2.4 – Modèle conceptuel d'un système karstique incluant les processus d'écoulement qui en sont caractéristiques ; les lignes tiretées vertes et rouges représentent les sous-systèmes sol-épikarst et eaux souterraines. Extrait de (A. HARTMANN, GOLDSCHIEDER et al., 2014)

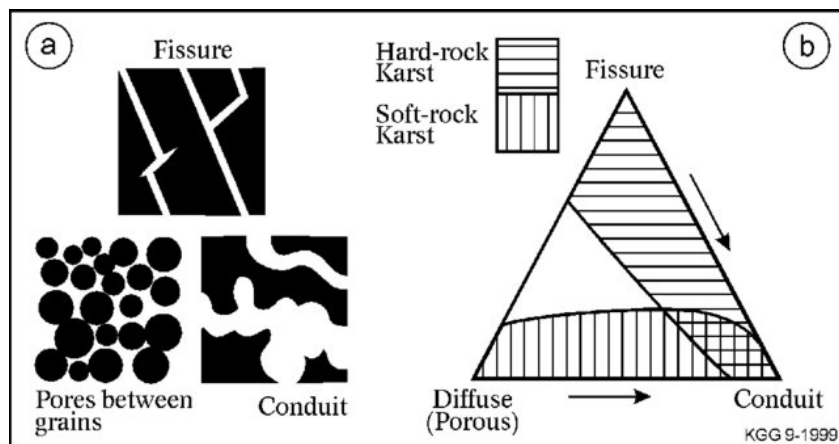


FIGURE 2.5 – Porosité des roches carbonatées : a) pôles, b) évolution de la perméabilité dominante. Extrait de GRIMES, 1999

Les paysages karstiques constituent par ailleurs un patrimoine naturel et hébergent pour certain un patrimoine culturel de grande valeur, comme l'illustre l'inscription de nombreux sites au patrimoine mondial de l'UNESCO (WILLIAMS, 2011). Les cavités et cours d'eau karstiques fournissent des habitats spécifiques associés à des spécificités écologiques (OLIVARI et GIUDICELLI, 2010; TRONTELJ, 2009); les assemblages faunistiques et la biodiversité peuvent varier d'un hydrosystème à l'autre, à l'intérieur même de grands ensembles karstiques, en raison de la séparation physique des différents réseaux (PRIÉ, 2008).

Enfin, les roches carbonatées constituent le plus grand réservoir de carbone du globe (HOUGHTON et WOODWELL, 1989). Leur altération consomme entre 0.2 et 0.7 Gt de carbone par an et constitue une composante importante (entre 7 et 25%) des puits de CO₂ terrestres (GAILLARDET, DUPRÉ et al., 1999; GOMBERT, 2002; Z. LIU et al., 2010). L'impact de l'altération des carbonates sur le cycle du carbone et la dynamique climatique a pourtant d'abord été considérée comme négligeable, car l'effet de puits est compensé à l'échelle du millier d'année par la réaction inverse de précipitation des carbonates dans l'océan. La dynamique temporelle très rapide de cette altération et sa sensibilité aux évolutions du climat et de l'occupation du sol en font pourtant un facteur pertinent aux courtes échelles de temps, tandis que l'altération par l'acide sulfurique pourrait être une source de CO₂ pour l'atmosphère et l'océan (GAILLARDET, CALMELS et al., 2019).

2.3 Positionnement scientifique

Mon activité de recherche a visé à mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique des hydrosystèmes karstiques, et s'est appuyée classiquement sur deux approches qui sont l'observation et la modélisation. Ces approches sont imbriquées et se répondent : les observations permettent de contraindre et évaluer la modélisation, qui en retour peut guider un dispositif expérimental vers des observations pertinentes.

Les problématiques opérationnelles associées à ces thématiques sont celles : 1) de l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères carbonatés, de la prévision de leurs débits de crue et d'étiage, de l'évolution des ressources et de l'optimisation des prélèvements à l'échelle d'un cycle hydrologique en vue d'une gestion territoriale optimisée et 2) de l'adaptation et de l'optimisation des dispositifs de mesure.

Chapitre 3

Présentation des travaux

3.1 Approches basées sur la modélisation

La modélisation permet d'évaluer la pertinence de notre compréhension des processus en jeu, mais aussi de prévoir la réponse du système étudié sous différents scénarios. C'est à la fois un outil fondamental d'avancée de la connaissance, et un outil de gestion.

3.1.1 Modèles hydrogéologiques : le cas du karst

Les modèles hydrogéologiques peuvent être rattachés à trois grands groupes en fonction du degré de physique qu'ils incorporent (KEESMAN, 1995 et Figure 3.1) : (i) les boîtes noires sont des modèles empiriques basés sur l'analyse des signaux d'entrée et sortie sans prise en compte des processus physiques ou de la structure du système (ex : fonctions de transfert et approches de type réseaux de neurones), (ii) les boîtes grises intègrent certains concepts ou processus mais ne permettent pas la correspondance directe entre paramètres et mesures (ex : modélisation réservoir globale ou semi-distribuée, mais aussi dans une certaine mesure les réseaux de neurones), (iii) les boîtes blanches sont des modèles basés sur les lois de la physique et au plus près des propriétés mesurables du système (ex : modélisation distribuée à base physique).

Ces trois catégories de modèles permettent la simulation de séries temporelles¹ ; cependant la pertinence des simulations menées sur des périodes ou dans des conditions différentes de celles de la période d'apprentissage ou calibration est directement dépendante du degré de connaissance du fonctionnement de l'hydrosystème qu'elles intègrent. Dans cet objectif comme pour l'évaluation de la connaissance des hydrosystèmes par la confrontation aux données, les modèles à base physique sont les plus pertinents, bien qu'eux aussi soient tributaires des limites de la connaissance qu'ils intègrent.

Le développement de modèles à base physique est l'objet de nombreux travaux visant à la mise en place d'un cadre conceptuel et numérique satisfaisant pour la modélisation des écoulements à petite échelle, le développement d'approches et d'outils permettant la simulation d'un réseau karstique à partir des connaissances géologiques et d'évolution paléogéographique, la mise en place d'outils théoriques permettant le changement d'échelle des propriétés de l'écoulement. Ces verrous, combinés à la difficulté de caractérisation des aquifères karstiques (voir infra Section 3.2.1) et à la complexité des études interdisciplinaires nécessaires pour comprendre l'organisation de l'hétérogénéité des karsts, explique en premier lieu le succès persistant des approches de type boîte grise en hydrogéologie karstique.

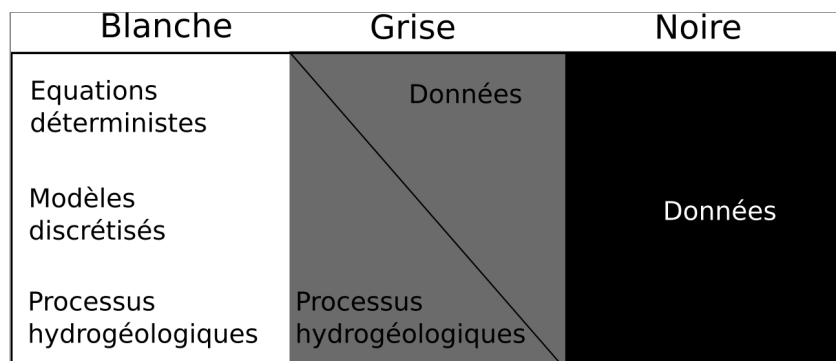


FIGURE 3.1 – Illustration du concept de “boîte grise”. Les boîtes blanches sont principalement basées sur la connaissance du système. Les boîtes noires sont construites à partir de l'analyse du signal. Les “boîtes grises” combinent les deux approches. Modifié d'après blacktowitz.

Les modèles de type boîte grise ne sont cependant pas les pis-aller de la modélisation hydrogéologique des karsts mais une piste de recherche toujours actuelle pour faire évoluer notre compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes

1. de façon non complètement satisfaisante (BODIN et al., 2012, JEANNIN, ARTIGUE, BUTSCHER, CHANG, CHARLIER, DURAN, GILL, A. HARTMANN, JOHANNET, JOURDE, KAVOUSI, LIESCH, Y. LIU, LÜTHI et al., 2021)

(BITTNER et al., 2020; DUBOIS et al., 2020; SEZEN et al., 2019; ZHOU et al., 2021). Ils présentent un niveau de complexité adapté à la quantité d'information contenue dans les signaux hydrologiques, permettent de confronter ces signaux au modèle conceptuel des écoulements et d'inférer la dynamique des principaux compartiments de l'hydrosystème.

3.1.2 Contribution à la modélisation réservoir

Cadre des travaux : thèse de doctorat (MAZZILLI, JOURDE, GUINOT et al., 2011); collaboration avec les collègues des laboratoires EMMAH (thèse de doctorat de C. Ollivier (OLLIVIER, MAZZILLI, OLIOSSO et al., 2020)), GET (thèse de doctorat V. Sivelles (SIVELLE, LABAT et al., 2019)); stage M2 R. Argouze (LABAT, ARGOUZE et al., 2022)), CEREGE (thèse de doctorat C. Baudement (BAUDEMONT, ARFIB, MAZZILLI et al., 2017)), Université d'Athènes (post-doctorat de N. Kazakis (KAZAKIS, CHALIKAKIS et al., 2018)), HSM (post-doctorat V. Sivelles (SIVELLE, JOURDE, BITTNER et al., 2021)).

Contexte : modélisation réservoir

Les modèles "réservoir" sont conçus comme un ensemble de boîtes dans lesquelles transitent les écoulements. La boîte supérieure recueille les précipitations²; une ou plusieurs boîtes se vidangent en direction de l'exutoire³ (Figure 3.2).

Ces modèles rejoignent la définition de la "boîte grise"⁴ : dans une certaine mesure, les nombre et relations entre réservoirs ainsi que la nature des fonctions de transfert (entre réservoirs et vers l'exutoire) sont supposés posséder un sens physique (MICHAEL B. ABBOTT, 1996). Par exemple, la structure la plus fréquemment utilisée comporte un réservoir supérieur supposé rendre compte des transferts dans le sol et l'épikarst, et deux réservoirs inférieurs aux dynamiques contrastées identifiés aux volumes matriciels (flux lents) et conduits karstiques (flux rapides)⁵. Ces modèles permettent aussi l'intégration des interactions entre eaux de surface et eaux souterraines (LABAT, ARGOUZE et al., 2022), de l'activation d'exutoires temporaires⁶ ou des effets d'hystérèse (TRITZ et al., 2011). Du fait du caractère global ou semi-distribué de ces modèles la correspondance faite entre réservoirs et volumes physiques n'est cependant qu'indicative. Il n'est par exemple pas possible de discriminer la vidange lente des volumes saturés de celle des volumes non saturés sur la seule base d'une modélisation pluie - débit. Enfin, une limitation fondamentale mais non spécifique des modèles réservoirs concerne leur capacité de simulation hors de la gamme de fonctionnement observée. Cette capacité est limitée quel que soit le type de modélisation, mais encore plus dans les approches conceptuelles qui ne rendent compte que de façon très frustrée de l'évolution verticale de la structure géologique du réservoir telle qu'une augmentation ou diminution⁷ de la porosité efficace en profondeur.

Au sein même de cette famille de modèles, un lien plus ou moins fort peut-être fait avec les processus. Par exemple, la prise en compte de la non-conservativité du bassin peut passer par la formalisation d'exutoires de trop plein, ou par le calage d'une fonction empirique dédiée (LE MOINE et al., 2007).

La répartition des écoulements dans différents réservoirs aux temps caractéristiques contrastés peut être rapprochée de la décomposition opérée en analyse du signal (DURAN et al., 2020). Par rapport aux approches de décomposition du signal, la modélisation réservoir permet une lecture beaucoup plus directe de la dynamique des différents volumes ainsi que l'examen de leur évolution sous différents scénarios.

Travaux

Dans cette thématique de modélisation réservoir, les principaux travaux auxquels j'ai pu contribuer ont permis :

- la caractérisation de la dynamique interne des réservoirs et de leurs échanges. J'ai ainsi pu proposer une première structure de modèle réservoir rendant compte d'interactions entre matrice et conduits (MAZZILLI, JOURDE, GUINOT et al., 2011). Cette interaction est un élément clef de la modélisation de plusieurs hydrosystèmes (LABAT, ARGOUZE et al., 2022). L'analyse de la dynamique interne des compartiments du modèle réservoir a aussi permis la mise en évidence des tendances inter-annuelles de stockage au sein des volumes matriciels (SIVELLE, LABAT et al., 2019).
- l'évaluation de la recharge, en général en lien avec une problématique d'AEP : estimation des volumes disponibles (excluant la composante d'écoulement rapide) (BAUDEMONT, ARFIB, MAZZILLI et al., 2017), analyse de la variabilité spatiale et temporelle à l'échelle d'un hydrosystème (OLLIVIER, MAZZILLI, OLIOSSO et al., 2020), évolutions possibles sous différents scénarios climatiques et de prélèvements (SIVELLE, JOURDE, BITTNER et al., 2021), évaluation de l'impact des prélèvements par renaturalisation (LABAT, ARGOUZE et al., 2022).

2. précipitations efficaces ou les précipitations liquides totales : dans ce second cas elle voit alors repartir une fraction de son eau sous forme d'évapotranspiration

3. les débits à l'exutoire constituent usuellement la variable de calage

4. approche "conceptuelle" ou "semi-empirique"

5. l'utilisation d'une fonction de transfert à temps caractéristique infini permet de rendre compte d'échelles de temps caractéristiques plus nombreuses tout en limitant la paramétrisation et a été proposée pour une meilleure prise en compte des comportements double milieu (GUINOT et al., 2015)

6. via une fonction de transfert se déclenchant lorsque la quantité d'eau dans l'un des réservoirs dépasse un seuil donné

7. par exemple avec l'atteinte du mur, ou la déconnexion d'une partie de l'hydrosystème du fait de configuration structurale (CLAUZON et al., 2020)

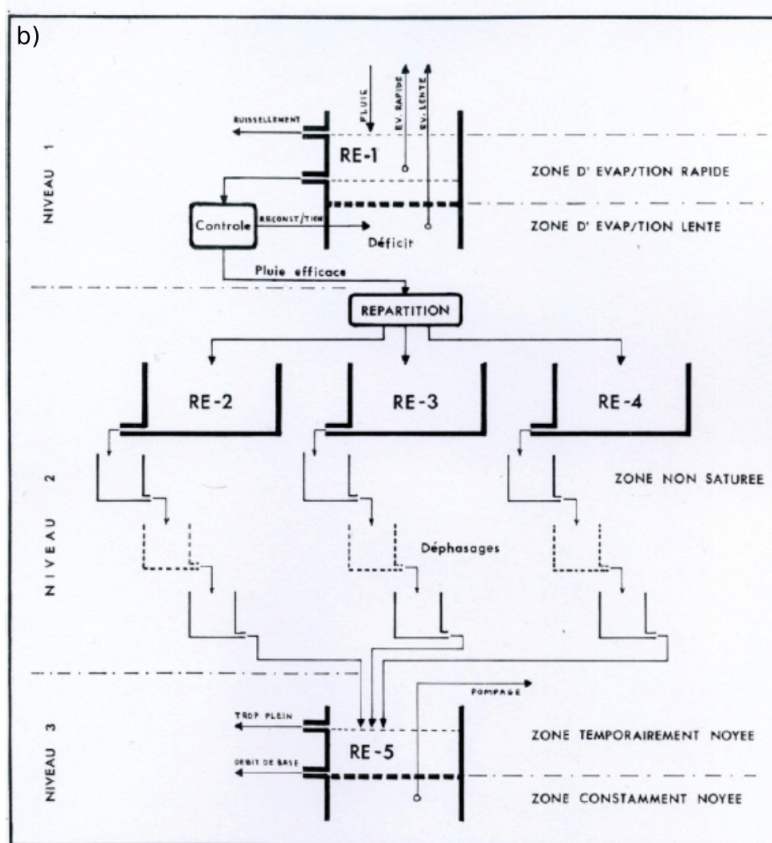
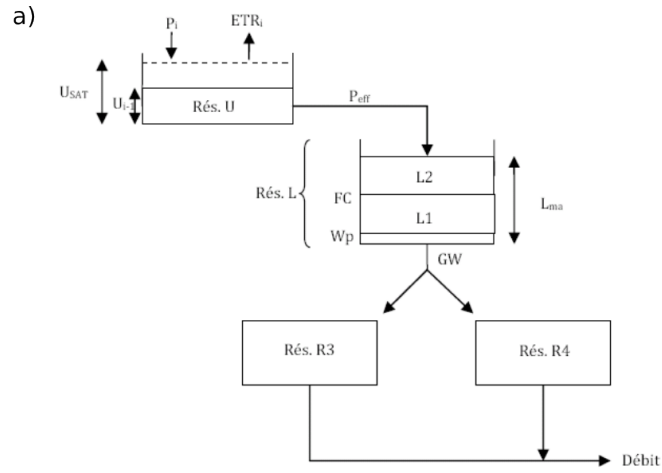


FIGURE 3.2 – Illustration des modèles réservoir : a) Modèle Mero (MERO, 1963), b) modèle Bemer (BEZES, 1976)

3.1.3 Apport aux bonnes pratiques de modélisation

Contexte

Les modèles sont des représentations imparfaites de la réalité (BEVEN et FREER, 2001 ; HALL, 2009) :

- ils la simplifient : la tâche principale du modélisateur est d'ailleurs de déterminer quels sont les processus dominants à l'échelle considérée, et comment les prendre en compte de façon satisfaisante.
- les observations qui permettent de les nourrir ou de les contraindre sont nécessairement entachées d'erreurs liées à la mesure (qui ne peut être infiniment précise) et à la fréquence d'échantillonnage (qui peut être insuffisante au regard des variabilités spatiale et temporelles de la variable observée). Les variables observées, qu'elles servent de donnée d'entrée ou de contrainte, sont souvent mesurées à une échelle qui n'est pas celle de la variable modélisée (DUBUS et al., 2003).
- la résolution numérique des équations du modèle s'accompagnent d'erreurs numériques, dont l'ampleur dépend des pas de temps et d'espace choisis pour la discrétisation et du schéma numérique utilisé. Ces erreurs peuvent en général être quantifiés (KAVETSKI et al., 2006).

Les échelles d'observation et de mesure n'étant en général pas identiques, les paramètres de la plupart des modèles doivent être calibrés. Cette estimation ne converge en général pas vers une unique solution du fait des erreurs listées plus haut : en général, les modèles numériques appliqués aux sciences de l'environnement constituent des problèmes "mal posés" (EBEL et LOAGUE, 2006), i.e. il n'existe pas une unique solution mais plusieurs amenant à des résultats équivalents. Cette problématique d'équifinalité est accrue par la réduction du problème à l'un ou l'autre de ses aspects qu'opère le choix d'un critère de calibration ("fonction objectif") qui écrase la complexité du signal mesuré en une unique valeur. Les pistes de réduction de cette équifinalité incluent la prise en compte des périodes de sensibilité maximale des paramètres dans le processus de calibration (GUPTA, SOROOSHIAN et al., 1998), l'intégration de variables de nature différente (A. HARTMANN, WAGENER et al., 2013; KUCZERA et MROCKOWSKI, 1998; SIVELLE, PÉROTIN et al., p. d., MAZZILLI, JOURDE, JACOB et al., 2013), le développement de fonctions objectif représentatives de caractéristiques hydrologiques pertinentes (signatures hydrologiques : A. HARTMANN, WAGENER et al., 2013; LE MESNIL, 2021; MCMILLAN, 2020; TODOROVIC et al., 2022).

Confronter un modèle au résultat d'observations pour évaluer la pertinence de sa structure et de l'identification et la prise en compte des principaux processus, ou interpréter des paramètres calés en termes de propriétés d'un hydrosystème, implique donc de peser les différentes sources d'inadéquation entre simulations et observations. Sans qu'ils ne soient l'objet principal de mes travaux, j'ai été attentive à ces "bonnes pratiques" de modélisation ; quelques résultats l'illustrant sont présentés ci-dessous.

Travaux : influence de la structure d'un modèle réservoir sur le comportement du biais d'initialisation

Cadre des travaux : thèse de doctorat (MAZZILLI, GUINOT et JOURDE, 2012b)

Le biais d'initialisation correspond à l'impact des conditions initiales d'un modèle sur les résultats de la simulation d'une période d'intérêt. À un impact direct sur les séries temporelles des variables simulées s'ajoute un impact indirect sur la paramétrisation retenue à l'issue de la calibration, et donc possiblement sur la pertinence des prévisions. Limiter ces impacts implique soit d'inclure les conditions initiales parmi les variables de calibration (approche retenue en modélisation événementielle), soit d'utiliser une période d'initialisation qui en permette la dissipation.

J'ai analysé la sensibilité locale des variables internes (stocks dans les réservoirs) et de sortie (débit à l'exutoire) à l'état de saturation initiale des réservoirs de deux modèles issus de la littérature. Cette analyse s'est appuyée sur une approche originale : les équations de masse du modèle ont été dérivées afin de faire apparaître le terme de sensibilité, puis résolues analytiquement. Cette approche analytique permet d'envisager la sensibilité locale pour chacun des points de fonctionnement du modèle. Les résultats obtenus ont la précision d'une analyse locale mais ne sont pas spécifiques à une paramétrisation donnée. La portée générale ainsi acquise permet de comprendre précisément la dynamique du biais, et son lien avec la structure du modèle.

Dans l'étude réalisée, le biais d'initialisation des deux modèles est évacué principalement au cours d'épisodes pluvieux mettant en fonctionnement les flux de transfert rapide associées aux plus hauts niveaux de saturation (Figure 3.3). La condition d'activation de ces chemins d'écoulement rapide est cependant différente d'un modèle à l'autre :

- pour le premier modèle, elle est associée à l'état de remplissage d'un réservoir à dynamique rapide,
- pour le second modèle, elle est associée à l'état de remplissage d'un réservoir à dynamique pluri-annuelle.

Dans le premier cas, le biais d'initialisation est évacué relativement rapidement par comparaison au second, et surtout de façon bien plus prédictible : conditionner l'activation de flux rapides à la saturation d'un réservoir à dynamique lente est en effet un facteur défavorable à la stabilité du fonctionnement du modèle. Par ailleurs, la dissipation du biais est d'autant plus rapide que la dynamique temporelle des cellules ou réservoirs considérés est également rapide.

Au-delà du cas d'étude, ce travail illustre l'importance de la connaissance intime du fonctionnement d'un modèle à réservoir dans la mise en oeuvre d'une modélisation et l'intérêt de l'analyse de sensibilité adossée à une résolution analytique des équations du modèle pour l'acquisition de cette connaissance. Il montre que dans le cas des modèles réservoirs utilisés pour la simulation de la relation pluie - débit des aquifères karstiques, la présence de seuils de saturation au-delà desquels certaines fonctions de transfert sont activées est associée à une forte non-linéarité du biais d'initialisation ;

l'activation de ces fonctions permet en quelque sorte une évacuation rapide du biais. A l'occasion de cette sortie, certaines variables internes et externes peuvent être transitoirement impactées dans des proportions importantes.

Connaître le comportement de ce biais permet selon l'approche de modélisation choisie de sélectionner la période de sensibilité maximale pour le calage de la condition initiale, ou au contraire de vérifier son inclusion dans la période d'initialisation. Enfin, ce comportement étant spécifique à chaque modèle, certains modèles peuvent présenter un comportement plus désirable que d'autres vis à vis de ce biais. Dans une certaine mesure, le comportement du biais d'initialisation peut ainsi être un facteur considéré dans la construction même du modèle.

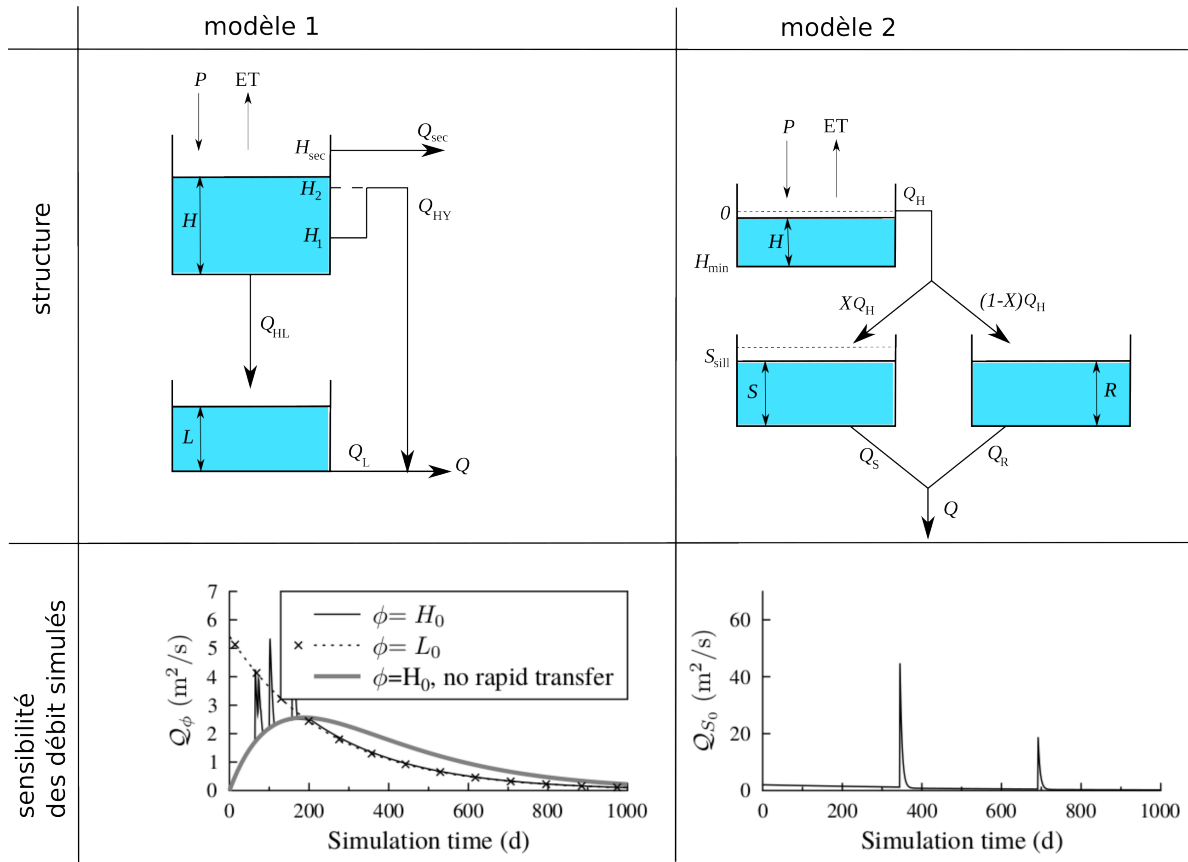


FIGURE 3.3 – Comportement du biais d'initialisation : comparaison du comportement du biais pour deux modèles de structures différentes. Dans le modèle 1, les flux rapides à l'exutoire sont en lien avec le flux Q_{hy} dont l'activation est asservie à la saturation du réservoir H de dynamique rapide. Dans le modèle 2, les flux rapides à l'exutoire sont en lien avec le flux Q_R . La proportion du flux Q_H qui est dirigée vers le réservoir R et donc qui vient alimenter ce flux Q_R est asservie à la saturation du réservoir S de dynamique lente.

Pour le modèle 1, la sensibilité du débit Q au niveau initial H_0 de remplissage du réservoir H fait apparaître des “pics” en première partie de simulation, en lien avec les périodes d'activation du flux rapide Q_{hy} qui interviennent avant la dissipation complète du biais d'initialisation de H_0 . Cette dissipation intervient en moins d'une année du fait de la dynamique relativement rapide de vidange du réservoir H.

Pour le modèle 2, la sensibilité du débit Q au niveau initial S_0 de remplissage du réservoir S fait apparaître des “pics” après plusieurs années de simulation, en lien avec les périodes d'activation du flux rapide associées à la saturation du réservoir S de dynamique lente.

Modifié d'après MAZZILLI, GUINOT et JOURDE, 2012b.

Cadre des travaux : thèse de doctorat G. Cinkus ; (CINKUS, MAZZILLI, JOURDE, WUNSCH, LIESCH, GOLDSCHIEDER et al., 2022 ; CINKUS, MAZZILLI, JOURDE, WUNSCH, LIESCH, CHEN et al., 2022)

Le calage des paramètres d'un modèle repose sur l'utilisation d'une fonction objectif qui traduit l'écart entre simulation et observation en une valeur unique appelée critère de performance. La fonction objectif opère une réduction drastique du problème de la mesure de l'adéquation entre observations et simulations. Prenons pour exemple la simulation de séries temporelles de débits : deux hydrogrammes différents peuvent être comparés sur la base du volume total écoulé, du timing des pics de crue, de leur forme générale, etc. En réduisant ces différentes caractéristiques à une valeur unique, la fonction objectif focalise l'opération de calage de façon préférentielle sur l'un ou l'autre des aspects de la réponse du système. Le choix d'une fonction objectif plutôt que d'une autre est donc un aspect essentiel de la démarche de modélisation, qui doit être guidé par les objectifs de la modélisation. Il influe sur la sélection de la (ou des) simulation(s) considéré(es) comme optimale(s), et donc sur les jeux de paramètres retenus et in fine sur l'interprétation qui pourrait en être faite.

Les fonctions objectif usuelles ont fait l'objet d'abondants travaux d'analyse et de critique. Les critères de type moindre carrés tels que le NSE par exemple donnent un plus fort poids aux écarts les plus importants en valeur absolue et donc aux périodes de hautes eaux, ce qui peut être au détriment de la qualité de la simulation des étiages (MOUSSA, 2010). Plusieurs auteurs considèrent ainsi qu'une approche de calibration multi-objectif ou multi-variables est nécessaire pour guider la calibration vers une simulation adéquate de différents aspects de la réponse du modèle (YAPO et al., 1998).

De façon intéressante, l'utilisation d'une fonction objectif unique relève déjà parfois de la calibration multi-objectif : plusieurs études visant à mieux comprendre les critères de type moindres carrés ont par exemple proposé des décompositions mettant en valeur différents aspects de la réponse du système. Une décomposition du NSE (Nash Sutcliffe Efficiency, (NASH et SUTCLIFFE, 1970)) a ainsi fait apparaître le coefficient de corrélation (r), la variabilité relative (rapport des écarts-types α) et le biais (rapport des moyennes β) des séries simulées et observées, et mis en évidence un déséquilibre dans la prise en compte de ces éléments (GUPTA, KLING et al., 2009). Partant de ce constat, une fonction objectif agrégeant ces trois indicateurs de façon plus équilibrée a été proposée. Cette nouvelle fonction (le King-Gupta Efficiency ou KGE) est actuellement largement utilisé, sous sa formulation initiale ou dans l'une de ses nombreuses variantes.

Lors d'un travail de comparaison inter-modèle (CINKUS, WUNSCH et al., p. d.), nous avons pu mettre en évidence une limitation de l'utilisation du KGE. Le modèle le plus satisfaisant d'après appréciation visuelle de la chronique simulée se voyait doté du KGE le plus défavorable (Figure 3.4). Après examen, ce résultat était la conséquence d'un meilleur score sur la composante β (bilan de masse) : les différentes sous-estimations et sur-estimations des débits se compensaient à l'échelle de la période simulée.

Nous avons reproduit cet effet sur un exemple synthétique (Figure 3.5) ; les mécanismes en ont été exploré dans une publication dédiée (CINKUS, MAZZILLI, JOURDE, WUNSCH, LIESCH, CHEN et al., 2022). La compensation découle de la construction même des indices de bilan de masse et variabilité, qui portent sur l'ensemble de la chronique temporelle. Leur pondération au sein de l'indice KGE est de 2/3, contre 1/3 seulement pour la corrélation (seule mesure d'erreur non soumise à compensation). Reproduire le volume écoulé ou la variabilité des débits à l'échelle pluri-annuelle est un objectif licite, mais n'est peut-être pas le plus pertinent pour une modélisation menée au pas horaire ou journalier. La pondération d'1/3 pour les erreurs non compensables doit ainsi probablement être relevée pour limiter l'occurrence des biais de compensation temporelle.

La proposition initiale de GUPTA, KLING et al., 2009 incluait d'ailleurs la possibilité d'une adaptation de la pondération par défaut au problème posé. Cette possibilité n'a pas été retenue jusqu'ici dans les différents travaux utilisant le KGE. Notre travail aboutit à la préconisation d'une prise en compte des composantes du KGE faisant une part plus importante aux mesures non globales, via une pondération appropriée.

De façon alternative à leur utilisation directe via une fonction objectif agrégée, les mesures de performance de type global, sujettes à compensation, pourraient être considérées dans le processus de calibration comme une contrainte aux jeux de paramètres retenus, utilisée pour éliminer les solutions ne satisfaisant pas une valeur seuil. Cette proposition peut être déclinée dans un cadre conceptuel cherchant une solution unique au problème de calibration (Figure 3.6), tout comme dans un cadre conceptuel cherchant un ensemble de solutions au problème de calibration.

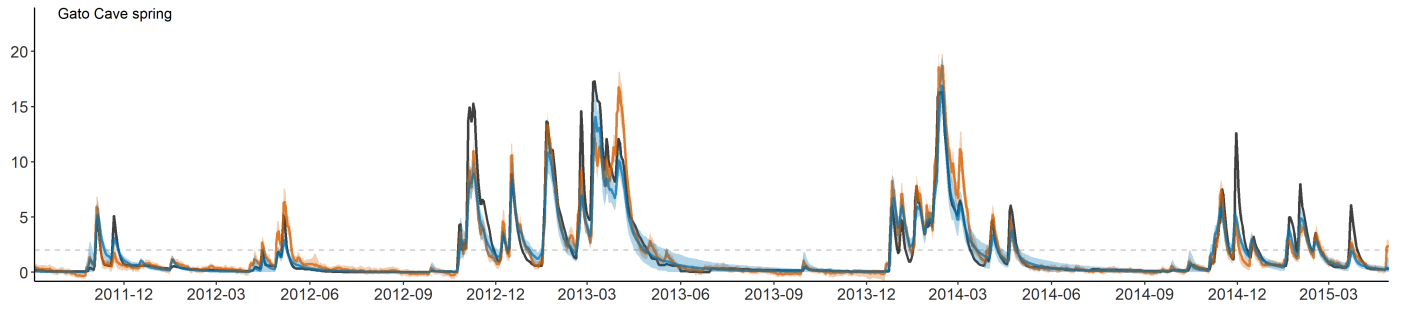


FIGURE 3.4 – Comparaison inter-modèles : simulation des débits à Gato Cave (Espagne) par réseau de neurones (ANN, courbe orange) et modélisation réservoir (LP, courbe bleue). Le modèle ANN est le plus performant au sens du critère KGE' (0.91 vs 0.85). D'après CINKUS, WUNSCH et al., p. d.

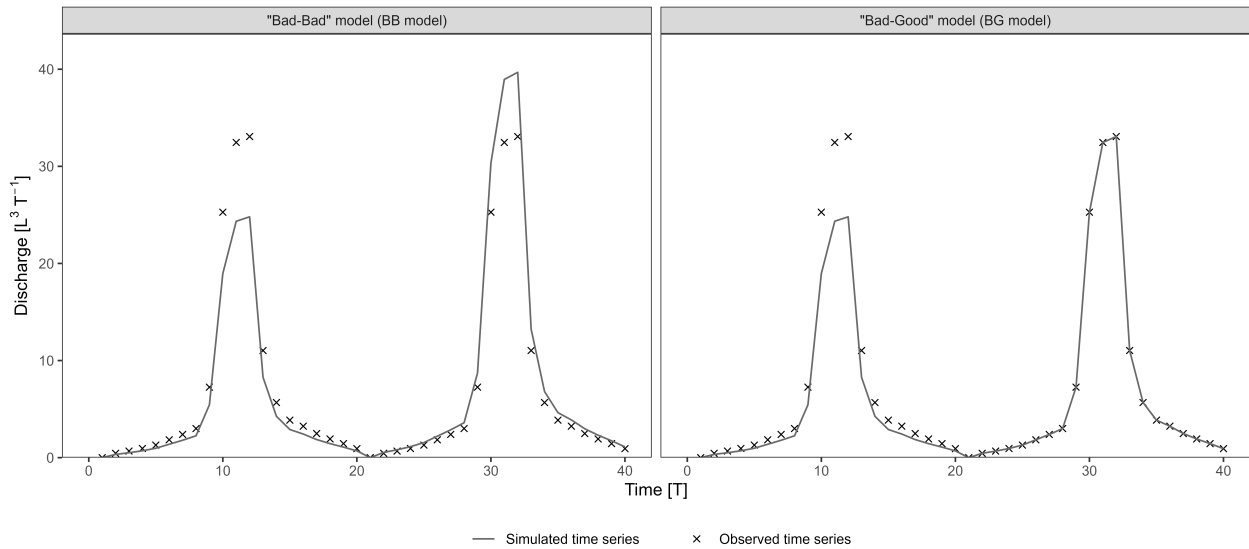


FIGURE 3.5 – Mise en évidence de l'influence de la compensation des biais et variabilité sur l'optimisation par KGE. Le modèle BG (figure de gauche) est le plus performant au sens du KGE et de ses variantes (score de 0.94 vs 0.87). D'après CINKUS, MAZZILLI, JOURDE, WUNSCH, LIESCH, GOLDSCHIEDER et al., 2022 ; CINKUS, MAZZILLI, JOURDE, WUNSCH, LIESCH, CHEN et al., 2022

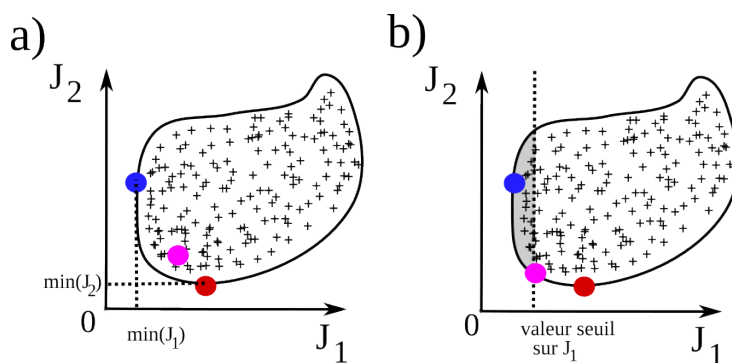


FIGURE 3.6 – Prise en compte des mesures de performances globales dans le cadre d'une calibration retenant une solution unique : illustrations des différentes possibilités. Les graphiques présentent les résultats de simulations associées à différents jeux de paramètres (croix) au regard de deux fonctions objectif J_1 (supposée globale et sujette à compensation) et J_2 (supposée non sujette à compensation). Les valeurs les plus faibles des fonctions objectif correspondent aux simulations les plus proches de l'observé. L'ensemble des réalisations est délimité par une ligne continue. Le disque bleu localise la simulation optimale au regard de J_1 ; le disque rouge localise la simulation optimale au regard de J_2 . L'optimum de J_2 est mieux défini que celui de J_1 , conformément à ce qui est généralement observé en calibration multi-objectif incluant des fonctions objectif globales.

- a) Dans le cas d'une calibration prenant en compte J_2 au même titre que J_1 , la réalisation optimale retenue sera celle associée à la valeur minimale d'une somme pondérée de J_1 et J_2 (disque rose).
- b) Prise en compte alternative de J_1 , Le jeu de paramètre optimal est sélectionné vis à vis de J_2 sous condition de valeur minimale de J_1 .

3.1.4 Diffusion des bonnes pratiques et de l’approche de modélisation

Contexte

La modélisation réservoir est un outil de première intention dans l’analyse des hydrosystèmes karstiques, mais le développement ou l’usage de ces modèles requièrent tout de même une certaine technicité. L’écriture d’un modèle de ce type peut ainsi rebuter des utilisateurs potentiels (étudiants, ingénieurs, chercheurs). Par ailleurs la plupart des structures de modèles adaptées aux systèmes karstiques étant fortement non linéaires, l’utilisation de schémas de résolution numérique non adaptés peut induire des biais non négligeables. Dans ce cadre la production et la diffusion de plateformes de modélisation précises et stables sur le plan numérique et fournissant les outils nécessaires pour apprécier les résultats d’une modélisation (pour reprendre les termes de KIRCHNER, 2006 : permettant de vérifier dans quelles mesures les “bonnes réponses” sont obtenues pour les “bonnes raisons”) est pertinente pour la communauté scientifique élargie.

Travaux : présentation de la plateforme KarstMod

Cadre des travaux : collaborations au sein du SNO KARST et animation du groupe de travail “modélisation” (MAZZILLI et BERTIN, 2019; MAZZILLI, GUINOT, JOURDE et al., 2019; MAZZILLI, OLLIVIER et al., 2022)

Dans le cadre du SNO KARST j’ai porté le développement de la plateforme de modélisation réservoir 1D de la relation pluie - niveau - débit **KarstMOD** (MAZZILLI, GUINOT, JOURDE et al., 2019). De nombreux collègues ont contribué au développement de cette plateforme et en particulier aux choix faits dans les structures et fonctions de transfert proposées. Les dernières évolutions de la plateforme (version 3.X) ont été portées par V. Sivelles et G. Cinkus, resp. post-doctorant et doctorant à HydroSciences Montpellier

Les objectifs du développement de cette plateforme étaient les suivants :

- proposition d’un choix suffisamment large de structures et fonctions de transfert pour rendre compte de la diversité des hydrosystèmes karstiques, mais d’un choix également “fini” permettant de guider les utilisateurs vers des configurations éprouvées. Le nombre de réservoirs proposés, leurs relations et les fonctions de transfert a fait l’objet d’après débats au sein du réseau...
- interface graphique rendant l’outil utilisable par des non-programmeurs. Cette interface a été réalisée sous java par un prestataire qui a également traduit en java l’ensemble du code fourni sous R (cf Figure 3.7).
- limitation des biais numériques par l’utilisation dans la mesure du possible des solutions analytiques (exactes) des équations de transfert. Ces équations ont pu être dérivées pour l’ensemble des cas, hors celui de fonction avec exposant non unitaire, et sont fournies en annexe du manuel utilisateur du logiciel.
- proposition de plusieurs fonctions objectif pouvant être agrégées avec une pondération au choix de l’utilisateur, afin d’apprécier différents aspects de la réponse du modèle.
- proposition d’un certain nombre d’indicateurs et graphiques permettant d’apprécier l’équifinalité et la sensibilité des paramètres du modèle.

Cette plateforme est actuellement utilisée à des fins d’enseignement (Table 3.1) et de recherche :

- par les équipes du réseau :
 - mise en évidence des tendances inter-annuelles de stockage au sein des volumes matriciels (SIVELLE, LABAT et al., 2019),
 - séparation des débits de base et flux rapides dans une perspective d’évaluation de la recharge effectivement disponible pour l’AEP (BAUDEMONT, ARFIB, MAZZILLI et al., 2017),
 - études méthodologiques (COUSQUER et JOURDE, 2022; SIVELLE et JOURDE, 2021),
 - évolutions possibles des débits à l’exutoire de la source de l’Oeillal sous différents scénarios d’évolution du climat et des prélèvements (SIVELLE, JOURDE, BITTNER et al., 2021),
 - contribution des différents compartiments de l’aquifère à l’acquisition de la signature spectrale du signal de débits (DURAN et al., 2020),
- par des équipes non associées au SNO KARST, dans le cadre de collaborations :
 - caractérisation hydrodynamique (KAZAKIS, CHALIKAKIS et al., 2018),
 - identification et quantification des processus de stockage et écoulement en zone non saturée (POULAIN et al., 2018),
- par des équipes non associées au SNO KARST, hors de tout cadre de collaboration :
 - compréhension de la dynamique interne et mise en évidence du rôle de la matrice dans le soutien des étiages (FRANK et al., 2021),
 - reconstruction de séries temporelles de débit (SCHULER et al., 2021),
 - décomposition des hydrogrammes en flux concentrés et diffus (LONCAR et al., 2018).

Le passage d’un code “maison” à une plateforme présentant une interface graphique a ainsi permis de promouvoir la mise en oeuvre de cette approche au sein du réseau et à l’international. Du point de vue de la formation, la prise en main de la plateforme a par ailleurs pu constituer le premier contact avec la modélisation pour des doctorants qui ont par la suite su mettre en oeuvre des démarches de développement.

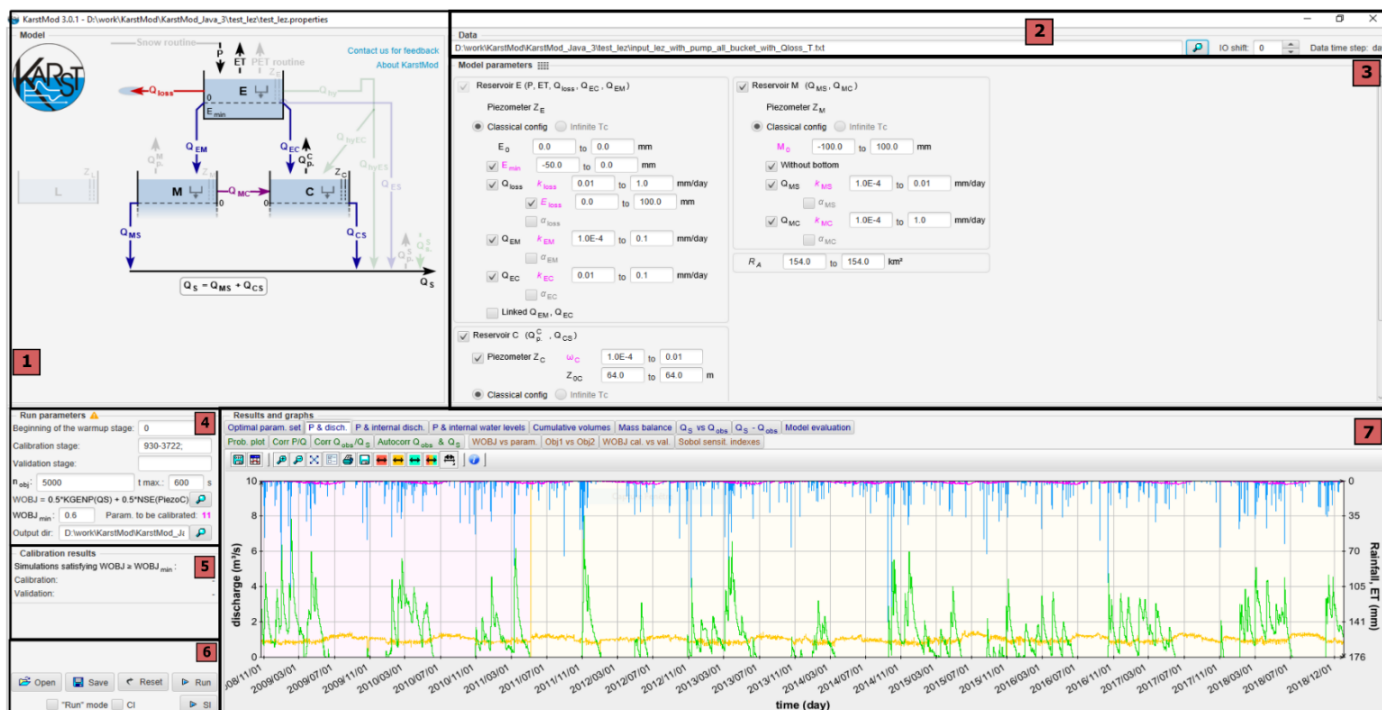


FIGURE 3.7 – Interface KarstMod. Les principaux blocs composant l'interface graphique sont les suivants : 1) Structure du modèle, 2) Données, 3) Paramètres du modèle, 4) Paramètres de la calibration, 5) Résultats de la calibration, 6) Barre de commande du logiciel, 7) Graphiques. D'après MAZZILLI, OLLIVIER et al., 2022.

Formation	Université
Master STPE	ENSG Nancy et Université de Lorraine
Master STPE	Université de Toulouse (parcours Géosciences, Réservoirs, Eau, Climats, Surfaces Continentales)
Master Gestion de l'Environnement, Gestion Durable des Hydrogéosystèmes	Université de Rouen Normandie
Master Eau (parcours Eau Ressource, Contaminants Eau et Santé, Eau et Société)	Université de Montpellier
Master Gestion de l'Environnement (Parcours Gestion territoriale des Risques Naturels, parcours Sciences de l'Eau, Management de l'environnement)	Aix-Marseille Université

TABLE 3.1 – Liste des formations utilisant KarstMod à des fins d'enseignement au sein du réseau SNO KARST.

3.1.5 Bilan de l'approche modélisation réservoir

Contexte des travaux : thèse de doctorat (MAZZILLI, JOURDE, JACOB et al., 2013), collaboration EMMAH (thèse de doctorat C. Ollivier (OLLIVIER, MAZZILLI, OLIOSSO et al., 2020; OLLIVIER, OLIOSSO, S. D. CARRIÈRE et al., 2021)), collaboration HSM, KIT (projet KARMA et thèse de doctorat G. Cinkus (CINKUS, WUNSCH et al., p. d.)).

L'intérêt principal des modèles réservoirs réside dans leur caractère de "boîte grise", cad dans le lien qu'ils établissent avec la structure et les principaux processus des hydrosystèmes. Leur degré élevé de conceptualisation est à la fois une force et une faiblesse : permettant un degré de complexité relativement adapté au contenu informatif des données, il limite aussi la traduction du fonctionnement des compartiments internes au modèle en termes de compartiments de l'hydrosystème. Ces limites se répercutent sur les possibilités de contraintes de ce type de modèles. Les paramètres des modèles réservoirs sont par exemple difficilement identifiables à des propriétés mesurables et il est en général nécessaire de les calibrer⁸. L'utilisation de variables de calibration interne est également délicate en raison de la difficulté d'identification des compartiments du modèle aux compartiments de l'hydrosystème⁹. C'est au détriment de la complexité de la structure et des flux pouvant être supportée par les données. Deux démarches sont alors possibles : i) l'amélioration de la mise en valeur du contenu informatif des données utilisées pour la calibration (fonctions objectif ou procédures de calages), ii) l'utilisation de variables de calibration complémentaires, en particulier issues de mesures réalisées à l'exutoire. Comme évoqué plus haut, l'utilisation de signatures hydrologiques fait partie des pistes de recherche actuelles, tout comme l'examen attentif des fonctions objectif les plus couramment utilisées (CINKUS, MAZZILLI, JOURDE, WUNSCH, LIESCH, CHEN et al., 2022). Les niveaux piézométriques à la source peuvent remplacer l'information débit en période de dénoisement dans le cadre d'une gestion active (MAZZILLI, JOURDE, GUINOT et al., 2011) : mais il ne s'agit pas alors d'une variable qui leur serait complémentaire (Figure 3.8). L'introduction de variables hydrochimiques est proposée par A. HARTMANN, WEILER et al., 2013. La conductivité électrique est peut-être la piste la plus prometteuse car il s'agit d'une information collectée à haute fréquence sur de nombreux systèmes. Son potentiel pour la réduction de l'incertitude est vérifié dans le cas d'une dynamique guidée par la dissolution des carbonates et la dilution des eaux d'infiltration (CHANG et al., 2021).

Par comparaison aux réseaux de neurones (ANN) qui sont un autre type de "boîte grise", les modèles réservoirs sont des structures figées. Leur structure explicite leur permet d'être en général plus performants que les réseaux de neurones lorsque les chroniques d'apprentissage (calibration) sont courtes. Cependant, leur capacité à reproduire des comportements peu fréquemment observés dépend de la capacité du modélisateur à identifier les points de changement de fonctionnement du système et suppose une adaptation de la structure du modèle, qui n'est pas nécessaire dans le cas d'une modélisation ANN (CINKUS, WUNSCH et al., p. d.). Les modèles réservoirs imposent par ailleurs une bonne connaissance des entrées du système, là où les modèles à apprentissage sont capables de sélectionner sans a priori les entrées les plus pertinentes¹⁰. La sélection opérée par les réseaux de neurones sur les données d'entrées peut même être mise à profit pour préciser les limites d'un impluvium (WUNSCH, LIESCH et al., 2022, KONG-A-SIOU et al., 2013). Enfin, le fonctionnement des compartiments qui ne sont pas en lien direct avec les entrées est difficilement inférable des modélisations ANN : l'intérêt spécifique de la modélisation réservoir réside dans sa capacité à quantifier la dynamique propre des réservoirs et de leurs échanges.

La complémentarité des différents types de modèles utilisés en hydrogéologie karstique (ANN vs modèles réservoir au sein des boîtes grises, mais aussi boîtes grises vs boîtes blanches) constitue peut-être la piste d'évolution la plus prometteuse. L'hybridation entre différents types de modèles est déjà mise en oeuvre en modélisation hydrologique (e.g. LERAT et al., 2012). Le couplage entre les modèles ANN et réservoir s'organise en général de façon séquentielle, les sorties du modèle conceptuel étant utilisées comme entrée de modèle ANN (e.g. MOHAMMADI et al., 2022; OKKAN et al., 2021). Un modèle pleinement couplé et plaçant l'ANN en tête de chaîne de traitement pourrait permettre de contourner les limitations des modèles réservoir relatives au traitement des données d'entrée et ainsi aussi mieux cerner leurs limites propres et voies d'amélioration.

8. le paramètre de réserve utile fait exception : il s'agit de celui qui se prête le mieux à une estimation. Le contraindre n'est cependant possible que dans le cadre d'une approche semi-distribuée, où la problématique d'équifinalité est par ailleurs exacerbée (OLLIVIER, MAZZILLI, OLIOSSO et al., 2020).

9. plusieurs études ont montré une bonne correspondance entre les niveaux internes des réservoirs de modèles globaux et des chroniques de piézomètres situés sur le bassin d'alimentation (DURAN et al., 2020, LABAT, ARGOUZE et al., 2022) : bien que cette correspondance vienne renforcer le crédit de la modélisation réalisée, le passage à une utilisation en tant que variable de calage reste délicat du fait du caractère très local de cette mesure. Également locales, les mesures hydrogéophysiques de type gravimétriques (en particulier surface - profondeur) et de Résonance Magnétique des Protons (RMP, cf Section 3.2.2) permettent de contraindre directement les variations de stock. Les échelles spatiales investiguées et / ou les contraintes de mise en oeuvre de ces mesures permettent difficilement d'envisager la couverture d'un hydrosystème à une fréquence spatiale et temporelle pleinement compatible avec la dynamique des écoulements. Elles restent cependant pertinentes dans le cadre des campagnes de mesures ciblant certaines périodes clef (MAZZILLI, JOURDE, JACOB et al., 2013), ou à l'échelle d'un site expérimental.

10. ils sont également capables de gérer directement l'obtention d'entrées moyennes sur le bassin à partir de données spatialisées

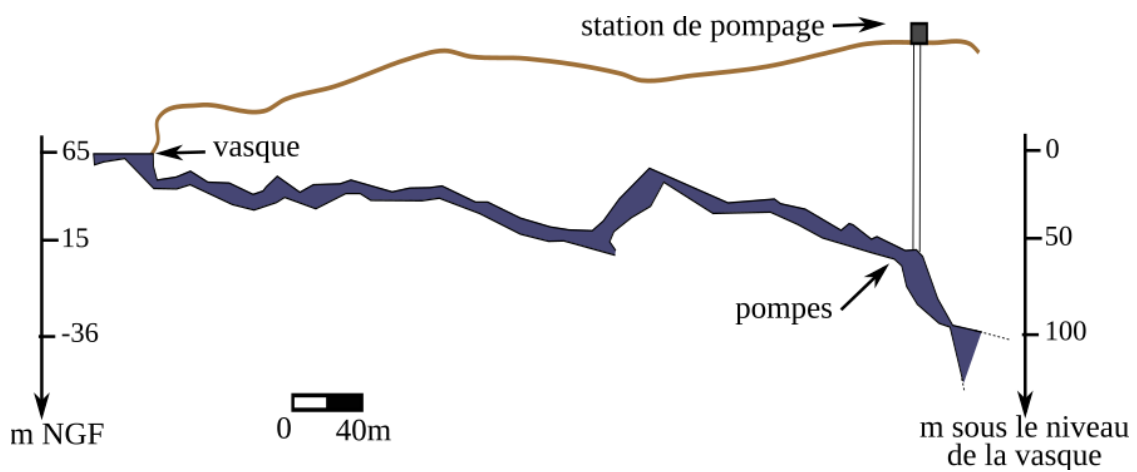


FIGURE 3.8 – Illustration des conséquences d'une gestion active conduisant au dénoiement d'une source sur les séries temporelles disponibles pour la modélisation : cas de l'aquifère du Lez. En hautes eaux, la source déborde. Les informations de débit et piézométrie sont disponibles et redondantes. En basses eaux, les prélèvements conduisent à un dénoiement de la source. Le débit à l'exutoire est nul, tandis que la piézométrie varie sous l'effet des pompages. On peut donc considérer que l'information piézométrique vient ici caractériser la dynamique de l'hydrosystème en remplacement de l'information de débit.

3.2 Approches basées sur l’observation

L’observation permet la contrainte des modèles et fournit le matériel nécessaire pour faire évoluer notre compréhension des processus d’écoulements. Mon implication dans les observations s’est d’abord traduite par la gestion des acquisitions sur le bassin expérimental de fontaine de Vaucluse - LSBB (section 3.2.1), le lien au SNO KARST¹¹ puis la co-coordination de ce réseau¹². Mes contributions en termes de recherche portent principalement : i) sur l’utilisation de la Résonance Magnétique des Protons (RMP) pour la caractérisation des teneurs en eau de la ZNS des hydrosystèmes carbonatés (section 3.2.2), ii) sur l’utilisation de la matière organique comme traceur naturel (section 3.2.4).

3.2.1 Démarche d’observatoire

Contexte : motivation de la démarche

Les observatoires en sciences de l’environnement L’acquisition de données hydrogéologiques est assurée par de nombreux acteurs : syndicats des eaux, exploitants, conseils départementaux, agence de l’eau... Ces dispositifs opérationnels, conçus dans une optique de gestion, fournissent un matériel précieux mais en général insuffisant pour répondre aux questions de recherche relatives au fonctionnement des hydrosystèmes.

La démarche d’observatoire de recherche traverse l’ensemble des disciplines des sciences de l’environnement. Cette démarche vise à documenter de façon précise, pertinente et durable l’évolution de variables clef de façon à permettre l’évolution de la compréhension des processus et leur intégration dans les modèles numériques (ROUX et al., 2011). La notion de durabilité des observations est importante pour répondre à la large gamme d’échelles de temps sur laquelle les processus étudiés et leurs forçages se déploient, et documenter leur évolution dans un contexte anthropisé. La notion de pertinence s’est traduite par la mise en place de jeux de données minimaux communs aux différents observatoires d’un même réseau et leur collecte au sein de bases de données, favorisant le partage des données et les travaux inter-équipes. La notion de précision a pu s’accompagner d’une certaine standardisation des pratiques et protocoles. En complément des observations de long terme, des expériences dédiées permettent de compléter la gamme de processus et d’échelles spatiales et temporelles investiguées.

L’interdisciplinarité est identifiée comme une clef en sciences de l’environnement (HICKS et al., 2010). Cette interdisciplinarité est dans une certaine mesure constitutive de l’hydrogéologie; elle est appelée à s’ouvrir plus largement vers de nouvelles interfaces (interfaces physiques, entre biotique et abiotique, entre hydrosystème et dynamiques sociales. . .) (BLÖSCHL et al., 2019). Dans cette perspective les observatoires hydrogéologiques peuvent jouer le rôle d’“objet-frontière” (GARIN, PATRICE et al., 2021) support d’interactions interdisciplinaires.

Cas des hydrosystèmes karstiques Les observations et expérimentations réalisées en contexte karstique sont confrontées à certaines problématiques spécifiques liées à l’hétérogénéité structurale et hydrodynamique des karsts.

La question de la représentativité des mesures, dans le temps et l’espace, s’y pose avec une acuité particulière. La gamme d’échelle temporelle sur laquelle se déploie la réactivité des karsts est large : pluriannuelle dans les volumes très capacitifs faiblement connectés, horaire ou sub-horaire dans les conduits karstiques. Dans les karsts matures, la connectivité et la conductivité évoluent avec l’échelle spatiale considérée (JAZAYERI NOUSHABADI et al., 2011; MEDICI et WEST, 2021). Les différents compartiments ont enfin des dynamiques propres très contrastées.

Contexte : présentation de l’hydrosystème de fontaine de Vaucluse - LSBB

Un karst à la fois extraordinaire et typique L’hydrosystème qui alimente la source dite “Fontaine de Vaucluse” (fdV), reconnu ressource en eau stratégique¹³, est un objet hydrogéologique à la fois extraordinaire et typique. Le caractère extraordinaire de ce système tient d’abord à ses dimensions : son bassin d’alimentation de plus de 1100 km² fait de fdV la source karstique de plus fort débit moyen interannuel de France (de l’ordre de 17 m³/s sur la période 1966-2021), et l’une des premières d’Europe. Il tient ensuite aux implications de ces dimensions sur le potentiel de recherche du site en termes de processus d’écoulement. Les dimensions du bassin d’alimentation atteignent l’ordre de grandeur des dimensions d’une plateforme carbonatée : l’hétérogénéité latérale des faciès carbonatés y est particulièrement sensible, fournissant un cadre intéressant pour mieux comprendre la relation entre ces faciès et la dynamique des écoulements. L’épaisseur importante de la zone non saturée (en moyenne 800 m) implique par ailleurs que la dynamique et la qualité des eaux de la fdV sont largement marquées par ce transit en ZNS, permettant ainsi une mise en évidence de l’influence de ce compartiment. La structuration messinienne du réseau karstique (avec pour conséquence un développement de la karstification sous le niveau de base, Figure 3.9) et son développement dans des calcaires crétacés pour partie de faciès urgonien sont par ailleurs des caractéristiques largement répandues sur tout le pourtour méditerranéen.

L’infrastructure LSBB Le Laboratoire Souterrain Bas Bruit (infrastructure LSBB) était l’un des deux postes de déclenchement des tir des missiles nucléaires du plateau d’Albion (MONIER, 2019). Ce site a été reconverti en Unité Mixte

11. ainsi qu’au SNO H+ depuis le printemps 2022

12. responsabilité partagée avec Hervé Jourde, HSM

13. la notion de ressource stratégique pour l’AEP désigne des “ressources : (i) dont la qualité chimique est conforme ou encore proche des critères de qualité des eaux distribuées tels que fixés dans la directive 98/83/CE révisée par la directive 2020/2184 du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine; (ii) importantes en quantité; (iii) bien situées par rapport aux zones de forte consommation (actuelles ou futures) pour des coûts d’exploitation acceptables“

de Service puis Unité d'Appui à la Recherche (UAR 3639) et est actuellement sous la pluri-tutelle d'Avignon Université et du CNRS.

Les 4 km de galeries subhorizontales du LSBB permettent l'accès à des points d'écoulements du réseau de fractures, failles et conduits karstiques faiblement hiérarchisés, complémentaires des points d'écoulement accessibles via le réseau spéléologique¹⁴. Ce sont des conditions quasi uniques d'observation des flux en zone non saturée.

La couverture rocheuse du LSBB qui fait son intérêt dans l'étude des écoulements est à l'origine d'un autre atout majeur du site, qui est son caractère bas bruit relatif à de nombreux signaux. Le LSBB est ainsi une plateforme attractive pour de nombreuses disciplines : cette configuration favorise les interactions pour l'étude des processus couplés.

A titre d'illustration des potentialités en termes de compréhension des processus hydrogéologiques, le LSBB est ainsi équipé d'un interféromètre longue base : les déformations mesurées sont corrélées à la dynamique hydrogéologique et peuvent éclairer certaines caractéristiques du réseau de drainage (LESPARRE et al., 2017). Deux gravimètres supraconducteurs localisés à des profondeurs différentes (KUMAR et al., 2021) permettent une estimation de l'évapotranspiration réelle (CARRIÈRE, LOISEAU et al., 2021) et la contrainte de modèles d'écoulements à l'échelle du massif qui héberge l'infrastructure.

Dispositif expérimental et insertion dans les dispositifs nationaux d'observation Un suivi régulier des paramètres physico-chimiques, ions majeurs, O^{18} est en place à la fontaine de Vaucluse depuis 1995, et au LSBB depuis 2002. Deux triplets de forages ont également été mis en place au LSBB courant 2014, l'un en zone non saturée peu profonde (plateforme Buissonnière - profondeur maximale atteinte 50 m), l'autre en zone saturée profonde et atteignant la zone saturée pour l'un des ouvrages (plateforme Gavotte - profondeur maximale atteinte 400 m).

La pré-existence d'observations et travaux, l'intérêt du site expérimental ainsi que le contexte très spécifique du LSBB ont motivé l'insertion du site dans les Services Nationaux d'Observation (SNO) H+ (GERARD et al., 2018) et KARST (JOURDE, MASSEI et al., 2018). Ces réseaux visent à fédérer les efforts réalisés par différents organismes de recherche fondamentale et appliquée sur l'étude respectivement des sites hydrogéologiques à petite échelle, et des hydrosystèmes karstiques. Les observations réalisées dans le cadre des SNO viennent nourrir l'Infrastructure de Recherche OZCAR¹⁵ (GAILLARDET, BRAUD et al., 2018) pour répondre à la même question générale d'évolution de la Zone Critique¹⁶ dans l'Anthropocène.

Travaux : apport au dispositif existant

Je me suis mobilisée pour compléter le dispositif d'observation existant afin qu'il réponde au mieux à nos objectifs de recherche.

À l'échelle locale sur le site du LSBB, et afin de permettre un suivi plus haute fréquence des processus, j'ai coordonné le développement et la mise en place de stations de mesure automatisées des débit, conductivité, température sur 12 points d'écoulements (une mesure de la fluorescence naturelle est également en place pour 4 de ces points, Figure 3.10). La conception de la colonne de mesure des débits doit beaucoup à Franck Tison (IR INRAe) ; elle a été motivée par l'absence de dispositif adapté pour couvrir une gamme des débits observés au LSBB (allant de l'intermittence à plusieurs l/min).

À l'échelle de l'hydrosystème et dans un objectif d'amélioration de la compréhension des processus d'écoulement, j'ai initié le suivi piézométrique de différents compartiments de l'hydrosystème (mesures en forages recoupant des volumes peu ou bien connectés, et en cavités - Figure 3.11) et consolidé les observations réalisées à la source :

- mise en place d'une sonde de mesure de la conductivité (rendue obsolète l'an passé par la mise en place d'un équipement similaire par le BRGM) : cette mesure fait partie du set de base des observations requises au sein du SNO KARST.
- mise en place d'un fluorimètre et d'une sonde spectrophotométrique. Ces deux équipements sont complémentaires dans le suivi de la matière organique naturelle, qui est un traçeur des processus d'écoulement rapide (cf section 3.2.4)

J'ai également initié¹⁷ le suivi de points d'écoulement amenant une échelle de travail intermédiaire (quelques km^2) et complémentaire des précédentes (sources de Millet, la Nesque, Saint Trinit - Figure 3.11). Par comparaison à la fontaine de Vaucluse, les impluvium associés à ces sources présentent une lithologie plus homogène. Par comparaison aux points d'écoulement du LSBB, ce sont des hydrosystèmes complets (avec ZS et exutoire).

Enfin, l'instrumentation des pertes de la Nesque, principale rivière de l'hydrosystème dont les pertes sont supposées alimenter la fontaine de Vaucluse, permettra de mieux contraindre l'ordre de grandeur des débits infiltrés et leur dynamique.

Du point de vue technique, en sus des interventions sur le terrain j'assure la gestion des intervenants (contractuels assurant les prélèvements bi-mensuels), ainsi que la gestion des données issues de capteurs autonomes ou d'expérimentations : traitement, validation, insertion dans les bases de données des SNO KARST et H+.

14. plus d'une vingtaine de kilomètres de réseau karstique topographiés sur l'hydrosystème

15. Observatoires de la Zone Critique - Application et Recherche

16. une définition couramment reprise de la Zone Critique est celle fournie par COUNCIL, 2001 : "the heterogeneous, near surface environment in which complex interactions involving rock, soil, water, air and living organisms regulate the natural habitat and determine availability of life sustaining resources"

17. pour certains points le suivi est a présent fonctionnel ; pour d'autres des ajustements sont encore en cours

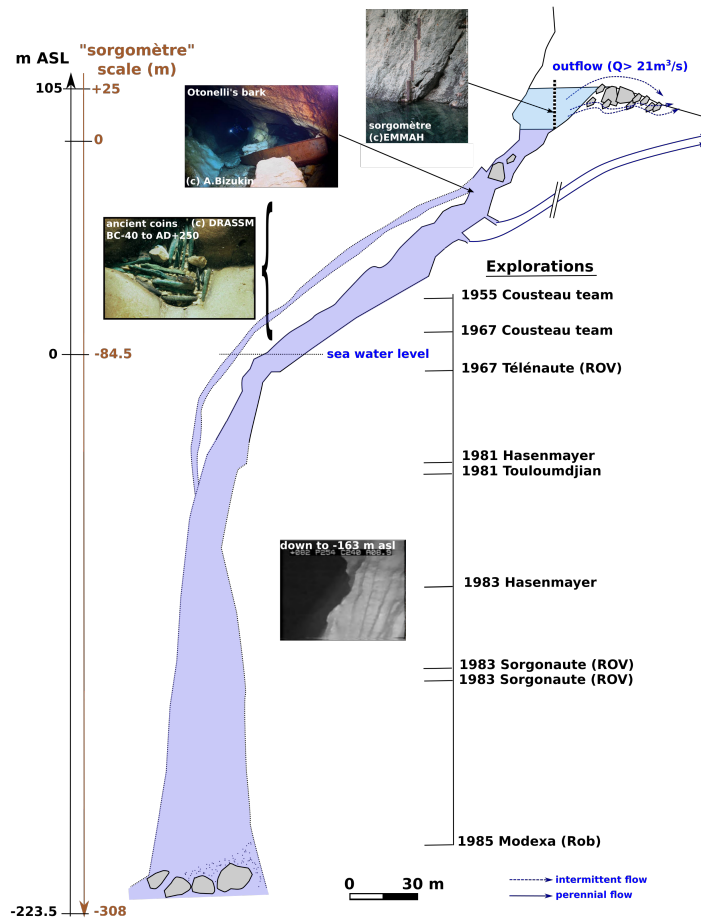


FIGURE 3.9 – Coupe schématique de la Fontaine de Vaucluse. Modifié d'après BAYLE et GRILLOT, 1987 par MAZZILLI, OLLIVIER et al., 2022.

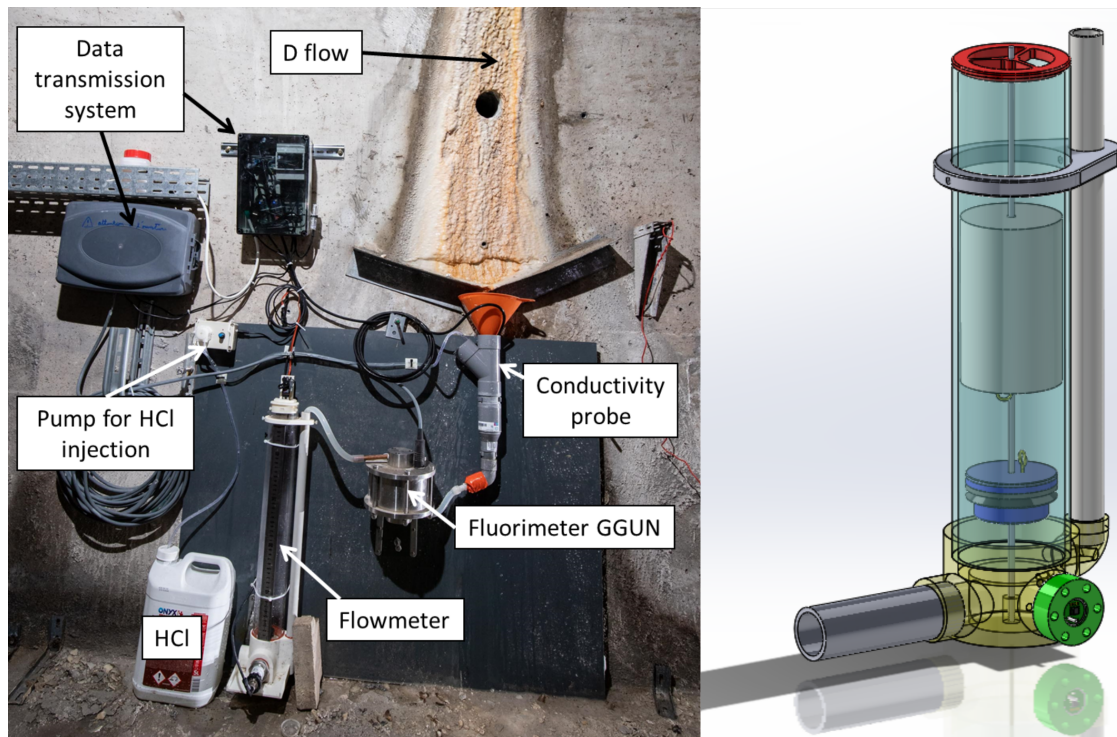


FIGURE 3.10 – Station de mesure automatisée - schéma de la colonne de mesure des débits. L. Serene, F Tison. Par rapport au dispositif présenté ici, les stations ont été enrichies de la mise en place d'une pompe doseuse (avec l'appui de R. Simler, permettant l'injection régulier d'acide, qui s'est avérée nécessaire pour éviter le concrétionnement du dispositif.

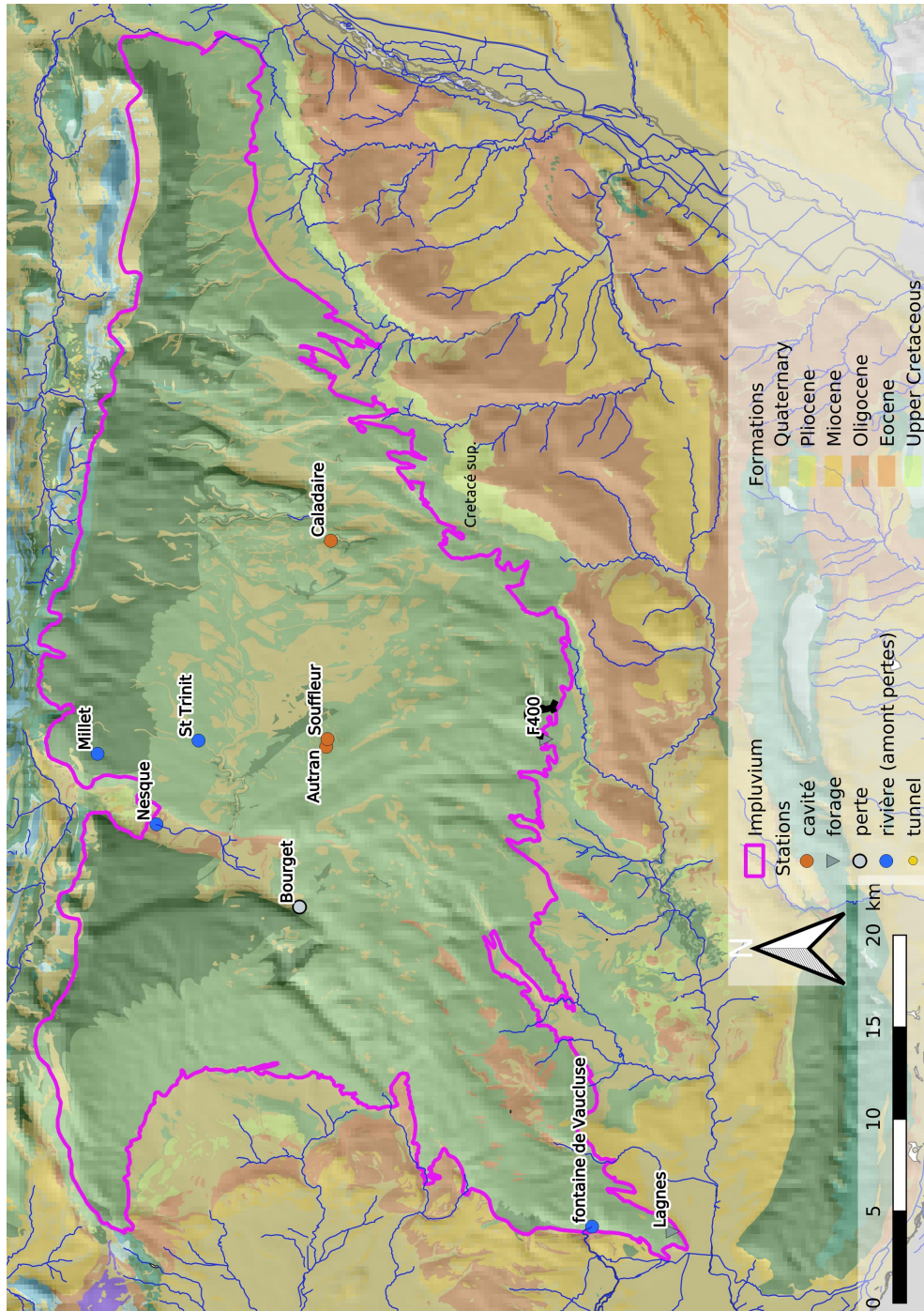


FIGURE 3.11 – Dispositif d'observation : localisation des points de suivi.

3.2.2 Quantification des stocks

Cadre des travaux : post-doctorat, thèse S. Carrière, collaboration ANDRA, thèse M. Bertrand et activité propre à l'observatoire (BERTRAND, DENIMAL et al., 2022 ; S. CARRIERE et al., 2016 ; MAZZILLI, BOUCHER, CHALIKAKIS, LEGCHENKO, JOURDE et CHAMPOLLION, 2016 ; MAZZILLI, CHALIKAKIS, S. CARRIÈRE et al., 2020)

Contexte

La "matrice" carbonatée des hydrogéologues correspond à l'ensemble des volumes faiblement perméables : matrice au sens propre mais également réseau de fissures et fractures faiblement ouvertes et/ou peu connectées. Elle constitue le pôle opposé, en termes de propriétés d'écoulement, aux conduits karstiques. Certains conduits peuvent être directement instrumentés (accès spéléologique) tandis qu'une instrumentation de la matrice est toujours destructrice. Les forages n'intersectant pas de conduit peuvent ainsi montrer une dynamique très différente de forages intersectant ce réseau à circulations rapides. Mais il est difficile de multiplier les ouvrages, et l'absence de conduit conducteur ne peut être garantie a priori.

L'hydrogéophysique renseigne sans détruire sur les propriétés hydrologiques du sous-sol (BINLEY et al., 2015). La plupart des méthodes ne traduisent cependant qu'indirectement la présence ou les caractéristiques de l'eau souterraine : par exemple, une plus faible résistivité peut être associée à une saturation accrue, ou à un contenu augmenté en argiles. Des renseignements directs sont pourtant offerts par la Résonance Magnétique Protonique (RMP) : l'enregistrement d'un signal par cette technique traduit sans équivoque la présence d'eau souterraine (LEGCHENKO, BALTASSAT et al., 2002).

J'ai eu l'opportunité de me former à l'utilisation de cette technique au cours de mon post-doctorat dans le cadre de l'ANR HG2, avec des mesures centrées sur le bassin du Durzon (Larzac). La présentation de ces travaux à l'occasion du colloque **IDust 2012** a permis d'initier une collaboration avec l'ANDRA visant à la caractérisation hydrogéologique des calcaires du Barrois sur le site de **Cigéo**. Cette collaboration se poursuit actuellement dans le cadre de la thèse de Mathieu Bertrand (UFC - AU). Suite à l'acquisition d'un équipement RMP à EMMAH (co-financé par le projet Interwells dont j'ai assuré la responsabilité scientifique), j'ai mis en place un suivi régulier sur le bassin de fontaine de Vaucluse (site de Buissonnière en surface du LSBB).

Je reste une simple utilisatrice, et non développeuse, de cette méthode. Cependant j'ai pu contribuer à faire avancer son développement à plusieurs reprises :

- en collaborant avec A. Legchenko sur la prise en compte des incertitudes sur l'inversion des volumes en eau (valeurs minimales et maximales sur l'ensemble du sondage) (LEGCHENKO et al., 2015).
- en mettant en évidence un dysfonctionnement de série à l'occasion des premiers tests du Numis Poly acquis à Avignon Université. Ce dysfonctionnement lié à un défaut du relai des récepteurs impactait l'amplitude des signaux mesurés (jusqu'à un facteur 0.25 entre deux sondages ou au cours d'un même sondage). Sa détection a été permise par l'excellent rapport signal sur bruit des sondages réalisés ainsi que le caractère répétitif des mesures (réalisées dans le cadre d'un suivi temporel). Suit à cette mise en évidence, ce sont les tests en laboratoire réalisés par A. Legchenko qui ont permis la reconnaissance puis la résolution du problème par IRIS.

Travaux : Variabilité des teneurs en eau RMP dans différents faciès carbonatés

La mesurabilité des teneurs en eau RMP en zone non saturée des aquifères carbonatés est l'un des premiers résultats de mon travail de post-doctorat (MAZZILLI, BOUCHER, CHALIKAKIS, LEGCHENKO, JOURDE et CHAMPOLLION, 2016). Dans ce travail, des sondages réalisés sur 16 sites sélectionnés pour représenter la variété des formations géologiques présentes dans le bassin du Durzon et celle des couvertures de surface (sol, pente, végétation) ont mis en évidence une forte variabilité des teneurs mesurées et permis de préciser les gammes de saturation associées aux différentes lithologies testées (calcaires marneux, calcaires siliceux et dolomie). Par la suite, des campagnes de mesure en zone non saturée sur le site de Buissonnière (LSBB) et Cigéo (Bure) ont permis d'étendre cette évaluation à d'autres contextes lithologiques.

Une quantification indirecte des stocks en ZNS est possiblement accessible par d'autres techniques hydrogéophysiques, mais requiert l'utilisation d'équivalences entre signaux et taux de saturation non vérifiées pour les milieux carbonatés¹⁸. Une quantification directe des porosités efficaces est possible à l'échelle du plug, mais il ne s'agit pas là d'une saturation, la mesure est par ailleurs destructrice et son échelle n'intègre pas la variabilité liée par exemple à la fracturation. Les mesures obtenues par RMP, intégratrices mais couvrant une échelle spatiale hydrologiquement significative, sont donc originales et pertinentes.

Les teneurs en eau mesurées mettent en évidence l'importance quantitative du compartiment zone d'infiltration pour le stockage au sein de la zone non saturée. Ce résultat bouscule le schéma conceptuel le plus couramment retenu, qui attribue le stockage de la zone non saturée à l'épikarst plutôt qu'à la zone d'infiltration vue comme un vecteur de transferts verticaux rapides le long des discontinuités.

Le stock d'eau faiblement mobile de la ZNS est par ailleurs à même d'impacter significativement le comportement hydrodynamique des bassins considérés : possible effet piston au sein des fractures ou fissures faiblement ouvertes et saturées, rôle de soutien des étiages, rôle de soutien de la végétation au cours des épisodes de sécheresse. La RMP est

18. dans le cadre du projet Interwells, l'inversion de données GPR acquises entre puits (PINARD et al., 2016) puis l'évaluation du taux de saturation à partir du modèle de permittivité diélectrique obtenu a par exemple amené à des valeurs de l'ordre du double des porosités plug mesurées sur ces forages. Travaux ISTERRE.

relativement aveugle aux premiers mètres du sol. Cependant en milieu forestier, et en particulier sur les sols maigres des substratum calcaires, la présence de racines est documentée jusqu'à plusieurs mètres de profondeur : les discontinuités leur permettent de s'enfoncer dans les zones altérées (McELRONE et al., 2004). Les teneurs en eau matricielle sont donc probablement un élément important de la résilience des couverts forestiers aux périodes de sécheresse prolongée. Les caractériser plus largement pourrait être un élément d'appréciation de l'impact futur des évolutions climatiques sur ce même couvert.

Enfin, la variabilité des teneurs en eau RMP reste importante à petite échelle au sein d'une même lithologie ; elle est particulièrement marquée sur le site de Buissonière¹⁹. Les facteurs de cette variabilité à petite échelle spatiale restent à explorer, en lien avec l'hétérogénéité des dépôts et la fracturation.

Travaux : Variabilité temporelle des teneurs en eau RMP

S'appuyant sur plusieurs campagnes de mesure réalisées à différentes périodes hydrologiques, les travaux menés sur le Durzon n'avaient pas permis de quantifier la variabilité temporelle des teneurs en eau RMP, restée en-deça des équivalences liées à l'inversion. Une variabilité saisonnière était en contrepartie notable à Buissonière (S. CARRIÈRE et al., 2016). Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces résultats contrastés. À Buissonière, les teneurs en eau et ratio signal sur bruit sont particulièrement favorables à la détection de petites variations relatives. Planifier une campagne RMP lorsqu'on ne dispose pas d'un appareil impose par ailleurs d'anticiper de plusieurs mois les dates de manipulation, et ne facilite pas l'échantillonnage des périodes de hautes eaux en particulier sur les systèmes peu inertiels, cas rencontré sur le Durzon.

L'acquisition d'un appareil RMP a permis la mise en place d'un suivi de deux ans sur le site de Buissonière. Ce suivi de fréquence mensuelle adapté à la capture d'une dynamique saisonnière a été complété par des mesures à plus haute fréquence temporelle à la suite d'un épisode pluvieux intense (168 mm cumulés sur 5 jours)²⁰. Il a également bénéficié des avancées réalisées par la communauté RMP en matière de traitement du signal²¹.

À l'échelle de l'épisode (MAZZILLI, CHALIKAKIS, S. CARRIÈRE et al., 2020), l'analyse des signaux non inversés a amené des résultats intéressants relatifs à la dynamique des écoulements : impact des précipitations sur les signaux RMP débutant 5 jours après l'épisode, relative stabilité des signaux entre 5 et 15 jours correspondant à une relative stabilité des saturations, puis diminution franche correspondant à un drainage notable à partir de 15 jours après l'épisode (Figure 3.12). La stabilité des saturations sur une période de pratiquement 10 jours est un résultat inattendu qui pourrait traduire l'importance des flux latéraux sur ce site de versant où plusieurs limites de séquence ou couches très peu poreuses et perméables jouent probablement un rôle de barrière hydraulique (voir plus loin Figure 4.3).

Sur l'ensemble des sondages réalisés dans le cadre du suivi de cet épisode, les temps de relaxation transverse (T_2^*) sont inversement proportionnels aux amplitudes initiales des signaux. Or, les amplitudes initiales des signaux RMP sont d'autant plus élevées que les teneurs en eau sont élevées. Les T_2^* dépendent eux de la distance entre les molécules d'eau et leur encaissant (LEGCHENKO et VALLA, 2002). À des T_2^* relativement élevés correspondent des distances relativement élevées : T_2^* est ainsi considéré comme un proxy des dimensions de la porosité saturée. En zone non saturée, on attendrait donc une augmentation des T_2^* (par saturation de la porosité) conjointement à une augmentation des amplitudes (correspondant à une augmentation de la saturation suite aux précipitations) : c'est l'inverse qui est observé sur nos données. La porosité saturée suite à l'épisode est donc en moyenne une porosité plus fine que celle initialement saturée. Les pistes d'explication de ce résultat (hétérogénéité des dépôts, mise en fonction de chemins d'écoulement rapide temporaires) viennent interroger le modèle conceptuel des écoulements sur le site.

Ces sondages ont pour dernière particularité une décroissance de la phase avec les pulses d'excitation. Celle-ci trouve pour unique explication théorique la présence d'une couche saturée superficielle, dans la zone de faible résolution des sondages RMP (LEGCHENKO, 2005). La présence de teneurs en eau élevées proches de la surface est assez directement expliquée sur certains sondages (Figure 3.13), pourrait correspondre à la présence d'eau dans un compartiment épikarstique, mais reste inattendue dans le cas des sondages réalisés en étiage d'été.

En conclusion, les suivis novateurs réalisés ont livré des éléments pertinents pour la compréhension de l'organisation des écoulements à l'échelle du site de Buissonière. Ces éléments demandent à être intégrés avec l'ensemble des acquisitions réalisées (voir perspectives de recherche détaillées en Section 4.1). Une approche similaire est actuellement déployée dans le cadre de la thèse de M. Bertrand (BERTRAND, DENIMAL et al., 2022). Dans un contexte lithologique et hydrogéologique tout à fait différent de Buissonière, les suivis RMP s'y montrent également pertinents pour permettre la compréhension d'une informations piézométrique complexe.

19. ainsi que le montre une campagne de mesure RMP dans le cadre de mon post-doctorat et de la thèse de Simon Carrière. 8 sondages se recouvrant partiellement ont été réalisés en 4 jours en étiage hivernal, permettant d'imager la variabilité à échelle d'une demi boucle et d'exclure tout facteur temporel lié à la dynamique des écoulements (S. D. CARRIÈRE, 2014)

20. un sondage RMP dure a minima plusieurs heures. Un suivi journalier correspond donc pratiquement à la plus "haute fréquence" accessible par cette technique, sous conditions de bruit électromagnétique satisfaisant...

21. et du développement et mise à disposition du logiciel NumPro par Anatoly Legchenko

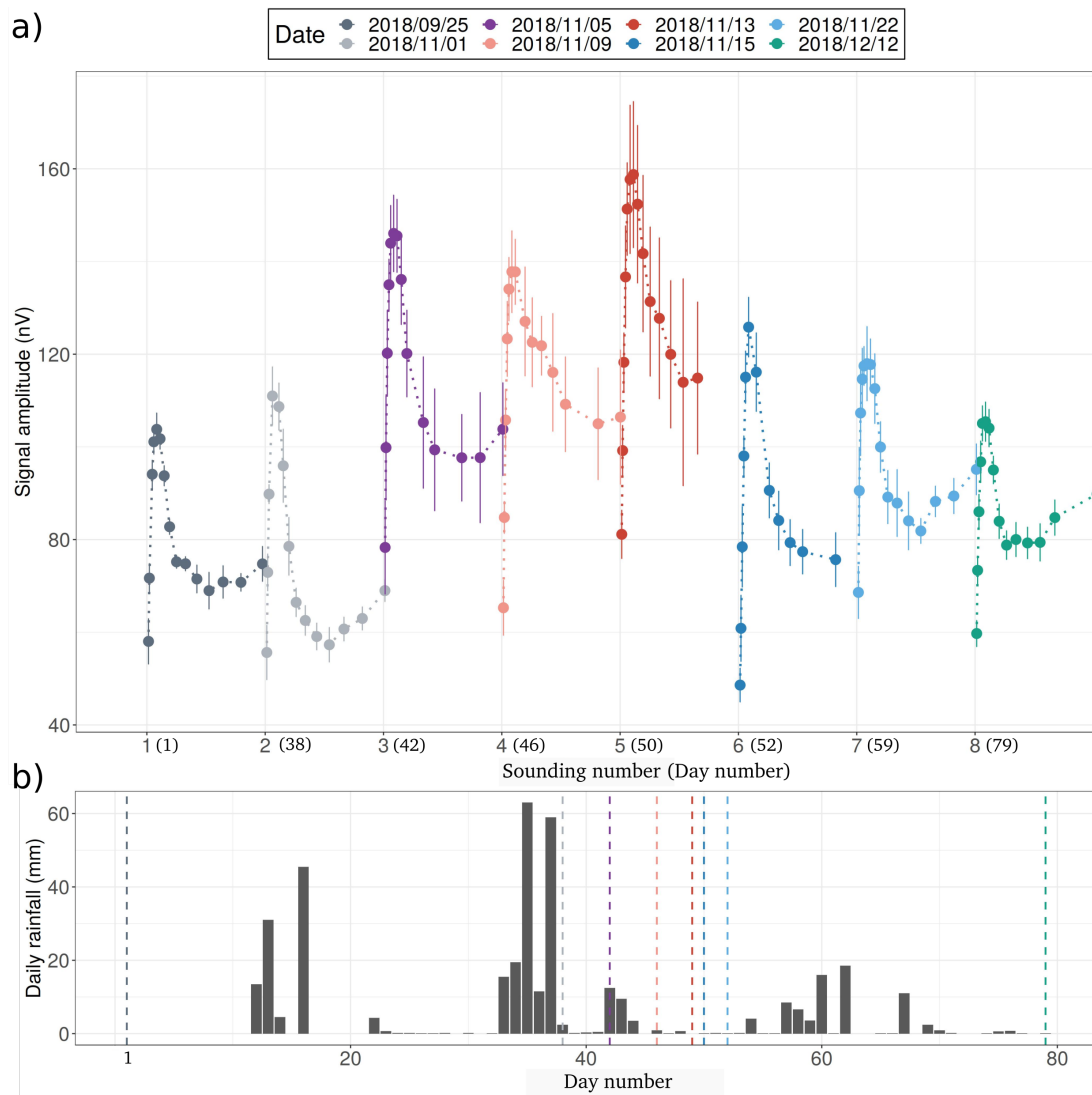


FIGURE 3.12 – Suivi RMP haute fréquence sur le site de Buissonière - illustration de la variabilité temporelle. (a) Amplitude du signal en fonction du pulse d'excitation, pour chacun des sondages réalisés. Les sondages figurent par ordre de réalisation (entre parenthèses, le numéro du jour de réalisation du sondage dans la campagne). (b) Précipitations journalières. Les lignes verticales tiretées marquent les dates de réalisation des sondages. D'après (MAZZILLI, CHALIKAKIS, S. CARRIÈRE et al., 2020)



FIGURE 3.13 – Écoulement de surface observé lors du suivi temporel RMP post épisode pluvieux. Cet écoulement est localisé en bordure de boucle.



FIGURE 3.14 – Trou souffleur : vue de la rivière d'Albion en moyennes eaux, à plusieurs centaines de mètres du point d'injection du traçage réalisé. Photographie Jos Mora Monteiro

3.2.3 Traçage artificiel

Cadre des travaux : projet Albion 2 ; collaboration HSM

Contexte

Les traçages artificiels sont un outil dont le champ d'application couvre l'ensemble des systèmes aquifères. La complexité des directions d'écoulement en milieu karstique a cependant motivé leur développement initial (MICHAEL B. ABBOTT, 1998) et explique l'utilisation particulièrement importante qui en est faite dans ce contexte (GOLDSCHIEDER, MEIMAN et al., 2008). Les essais de traçage artificiel permettent en effet d'apporter la preuve de la connexion par transfert de masse entre deux points d'écoulement. Sous réserves d'hypothèse faites sur les circulations souterraines, ils permettent de déterminer des vitesses d'écoulement, diamètres et volumes de conduits, (SMART, 1988), les paramètres de transport (GEYER et al., 2007), voire de préciser la structure du réseau karstique (PERRIN et LUETSCHER, 2008 ; QI et al., 2018) ou les régimes d'écoulement (MASSEI, H. Q. WANG et al., 2006).

Les paramètres de transport ainsi déterminés sont cependant dépendants de la distance entre point d'injection et point de restitution, des conditions hydrologiques à la date de l'essai et de la nature des volumes traversés. Des éléments théoriques confortés par l'analyse de large bases de données permettent d'aborder la variabilité des réponses liées à la longueur des trajets et à la variabilité des vitesses d'écoulement²² (BAILLY-COMTE et PISTRE, 2021). Cependant dans la plupart des essais et pour des raisons pratiques les injections de traceurs sont réalisées depuis la surface ou par accès spéléologique dans des conduits karstiques de zone non saturée parcourus par un écoulement, tandis que la restitution est observée à l'exutoire. La caractérisation réalisée reflète ainsi les processus d'écoulement au sein de différents compartiments. Plusieurs travaux se sont attachés à discriminer ces contributions par la mise en oeuvre d'essais impliquant plusieurs point de suivi et/ou des points d'injections ou suivi différents du réseau spéléologique (LAUBER et al., 2014 ; MORALES et al., 2017 ; PRONK et al., 2009). Les écoulements à surface libre spécifiques des zones non saturée et épiphréatiques font ainsi partie des éléments susceptible d'influencer significativement la dispersion cinématique caractérisée par les essais (LAUBER et al., 2014).

Travaux

Les travaux présentés ci-dessous ont été réalisés dans l'objectif : (i) d'évaluer la vulnérabilité de la fontaine de Vaucluse à une potentielle contamination se produisant en surface d'une cavité majeure (système souffleur), (ii) d'évaluer l'impact de l'épaisseur de ZNS traversée sur la dispersivité au sein de ce système. Les moyens mis en oeuvre consistent en la réalisation d'un double essai par traçage et une ré-interprétation d'un traçage réalisé antérieurement. J'ai conçu l'ensemble du dispositif, mené la recherche de données sur les traçages historiques, coordonné et participé à l'injection des traceurs. L'interprétation de l'essai a été réalisée dans le cadre d'un stage de M2²³ que je n'ai pas co-encadré, étant alors en congé maternité.

La commune de Saint Christol concentre la majorité des cavités karstiques d'ampleur kilométriques inventoriées sur l'impluvium de fontaine de Vaucluse. Parmi ces cavités, le trou souffleur est le système le plus développé et le seul atteignant la zone noyée. Un double essai y a été réalisé au printemps 2019 (Figure 3.15), consistant en : (i) l'injection de 34 kg de fluorescéine à -750 m en zone noyée alimentée par un écoulement de quelques L/mn, (ii) l'injection de 60 kg de sulforhodamine B en zone non saturée parcourue par un écoulement d'une centaine de L/mn (rivière d'Albion, cf Figure 3.14). La restitution suivie à la fontaine de Vaucluse a débuté trois mois après l'injection et a duré deux mois. La distribution des temps de séjour est présentée en Figure 3.16.

L'allure de la restitution de la fluorescéine est atypique : son asymétrie est inverse de celle habituellement observée. Elle s'accompagne d'un taux de restitution de l'ordre de 10%. En modélisation directe, cette forme de restitution peut être reproduite par la combinaison de deux arrivées²⁴. Considérant que l'injection a été faite dans un volume noyé de grandes dimensions et faiblement alimenté²⁵, et qu'elle a été suivi d'un épisode pluvieux une dizaine de jours après, cette combinaison de deux arrivées peut être interprétée comme un départ du traceur en deux temps : (i) première arrivée correspondant à un départ lent du traceur entre l'injection et les précipitations qui lui font suite, (ii) seconde arrivée correspondant à un départ plus massif du traceur du fait des précipitations. Les paramètres de cette seconde arrivée peuvent ainsi être interprétés comme caractéristiques de la zone noyée.

Le taux de restitution de l'ordre de 80% de la sulforhodamine est exceptionnel compte tenu de la distance tracée (une trentaine de km). Il indique une très bonne connectivité entre le gouffre et l'exutoire et confirme la vulnérabilité de celui-ci vis à vis d'un contaminant déversé dans l'un de ses amonts. La dispersivité caractérisée correspond à un trajet mixte zone saturée et zone non saturée. Sur la base de la topographie du gouffre, une distance approximative peut être assignée au trajet de l'eau entre le point d'injection en ZNS et la ligne d'écoulement dans laquelle a été réalisée l'injection en ZS. La caractérisation de la dispersivité spécifique au trajet en ZNS constitue une piste de recherche qui n'a pas encore été explorée.

22. supposées homogènes sur le trajet

23. encadré par Véronique Léonardi

24. correspondant par ex. à un comportement de type double milieu, ou à deux injections successives

25. sommet d'un puits noyé. On peut considérer qu'il s'agit d'un système annexe au drainage.

La ré-interprétation d'un traçage réalisé en 1974²⁶ dans l'un des amonts du trou souffleur (aven du château) a fourni une valeur de dispersivité supplémentaire qui peut être comparée aux précédentes, permettant une première ébauche de la relation entre épaisseur de ZNS traversée et dispersivité.

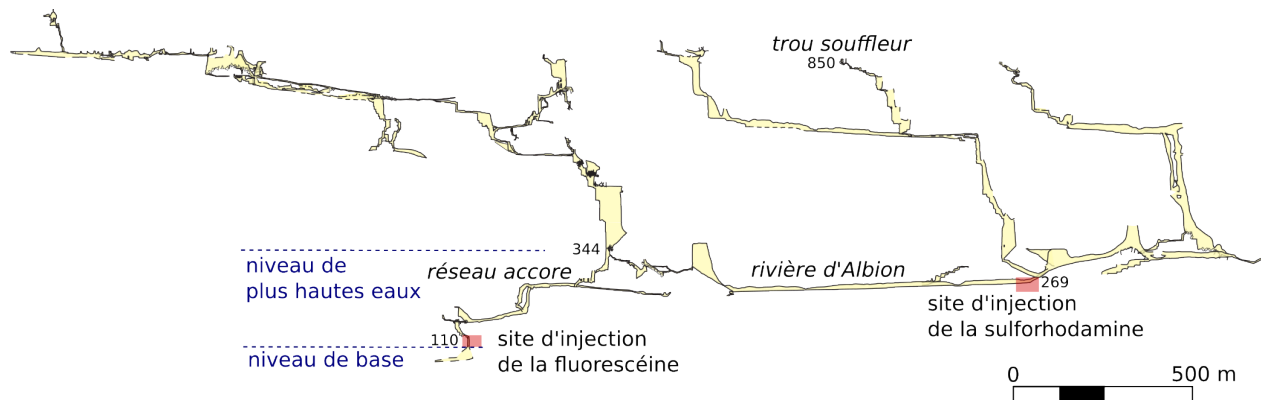


FIGURE 3.15 – Essai par traçage trou souffleur - fontaine de Vaucluse : localisation des points d'injection dans le réseau. Distance à vol d'oiseau au point de restitution : 31 km. Topographie GSBM, GORS. Modifié d'après synthèse topographique et dessin de Guy Demars.

26. traçage avec restitution positive ayant l'objet d'un suivi par mesure in situ de la fluorescence au moyen d'un fluorimètre de terrain. Ce traçage a été retrouvé grâce au travail d'archives d'Alain Couturaud.

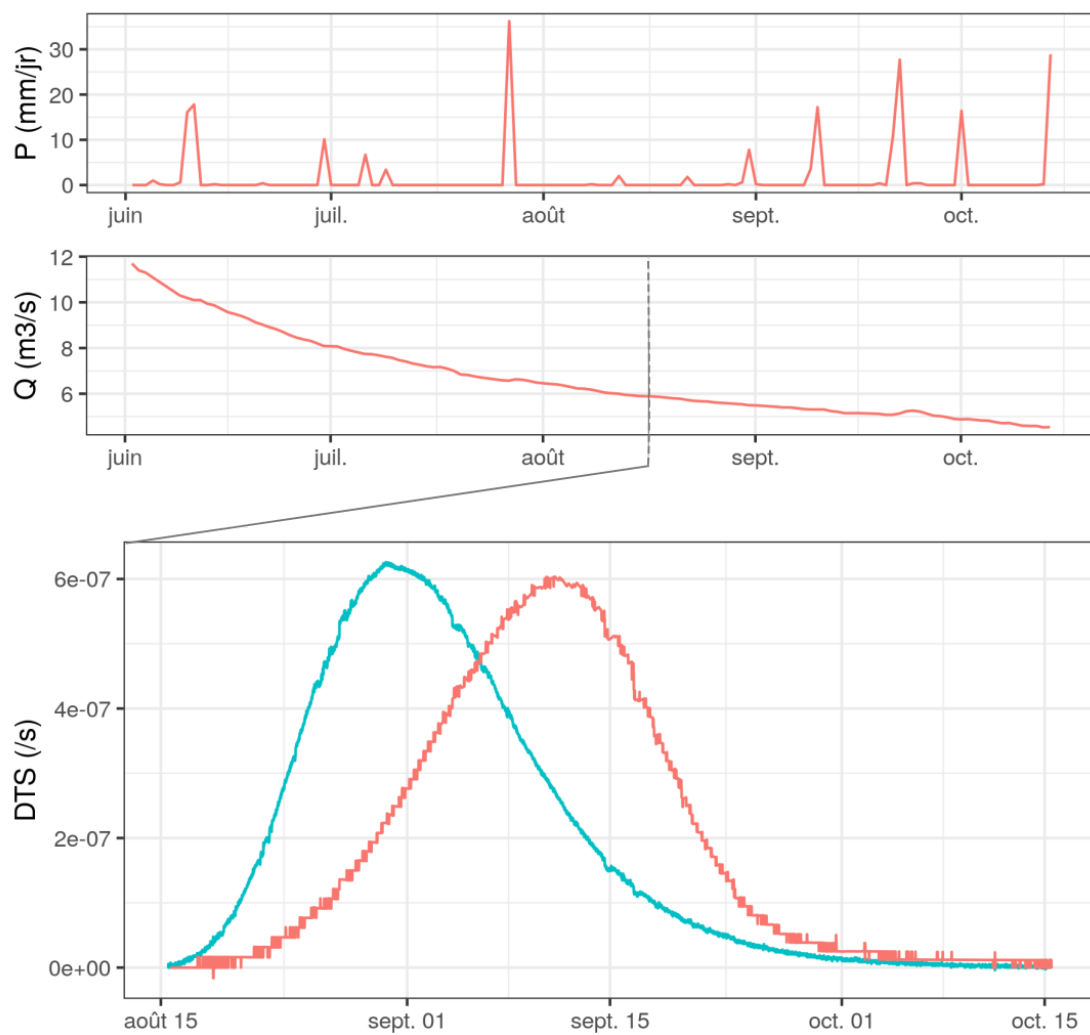


FIGURE 3.16 – Essai par traçage trou souffleur - fontaine de Vacluse. Précipitations, débit au point de restitution, distribution des temps de séjour (bleu : sulforhodamine, rouge : fluorescéine). Les chroniques de précipitation et débit couvrent l'ensemble de la période de suivi, depuis l'injection jusqu'à la fin de la restitution. La chronique de DTS est restreinte à la période de restitution.

3.2.4 Traçage naturel

Contexte

Les données hydrochimiques et isotopiques sont un levier puissant pour évaluer si un modèle donne les bonnes réponses pour les bonnes raisons (KIRCHNER, 2006) : en complément de la réponse hydrodynamique elles précisent l'origine des eaux, son âge relatif voire les temps de transit, les processus hydrologiques et biogéochimiques.

Les travaux présentés ci-dessous sont des travaux en cours. N'étant pas hydrochimiste, ma participation à ces travaux a été motivée par l'objectif de mieux cerner les processus de circulations souterraines en zone non saturée des aquifères carbonatés et a pris pour support l'observatoire de fontaine de Vaucluse - LSBB dans le cadre de travaux portés par Christelle Batiot (HSM) et Christophe Emblanch (AU).

Au sein d'un hydrosystème très capacitif et peu transmissif, les objets discrets transmissifs tels que les failles et les conduits karstiques jouent un rôle important dans la recharge : ils assurent des flux d'infiltration verticaux rapides, sur une échelle de temps de transit pouvant être aussi rapide que de quelques heures à quelques mois. Ce sont ainsi des acteurs majeurs de la recharge des hydrosystèmes. Cette gamme de temps de transit n'est cependant pas couverte par la plupart des traceurs du temps de séjour. Mettre en place des traceurs des courts temps de séjour est ainsi nécessaire pour mieux comprendre ces circulations rapides et le rôle hydrologique des objets discrets transmissifs. C'est ce qui motive la contribution au développement de l'utilisation de la matière organique naturelle comme traceur des courts temps de séjour présentée en ici.

Travaux : Utilisation de la matière organique naturelle comme traceur naturel des courts temps de séjour

Cadre des travaux : thèse de doctorat L. Serene et projet Albion 2 (SERÈNE, BATIOU-GUILHE, MAZZILLI, EMBLANCH et al., 2022 ; SERÈNE, MAZZILLI et al., 2022)

Plusieurs familles de composés, de complexité et cinétiques de dégradation variées, constituent la matière organique naturelle d'origine pédologique. Dans sa phase dissoute, cette matière organique présente en général une propriété de fluorescence. La spectrofluorimétrie permet ainsi d'évaluer de façon quantitative la nature des composés qui la constituent. Ces composés évoluent sous l'action de l'activité biologique, dans une gamme d'échelle de temps de l'ordre de quelques mois (BATIOU et al., 2003). Le suivi de la matière organique fluorescente dans les eaux souterraines paraît donc pertinent pour la mise en évidence des flux d'infiltration associés à des temps de transits inférieurs à cette échelle de temps.

Le degré de maturation de la matière organique dissoute du sol peut être caractérisé par sa proportion relative (index HIX) de composés humiques (composés organiques complexes et stables issus du processus d'humification, associés à des longueurs d'onde de fluorescence relativement élevées) sur l'ensemble des composés organiques fluorescents (humiques et protéiques, les protéiques étant des composés plus légers associés à des longueurs d'onde de fluorescence relativement faibles) (ZSOLNAY et al., 1999).

Par analogie avec les travaux menés dans les sols et en formulant la double hypothèse de (i) stabilité des teneurs relatives de ces différents composés à l'entrée dans l'hydrosystème et (ii) dégradabilité constante dans le milieu souterrain, BLONDEL et al., 2012 propose de lier les évolutions relatives de ces composés aux temps de transit dans l'hydrosystème. Ses travaux aboutissent à une relation entre le HIX et les temps de séjour. Par rapport à une analyse directe des teneurs des différents composés, l'utilisation d'un ratio permet de s'affranchir des variations saisonnières des valeurs absolues. Un ratio élevé signe un temps de transit relativement long comparé à des valeurs plus basses.

L'un des objectifs du travail de thèse de Leïla était d'affiner le lien entre HIX et temps de séjour. L'analyse critique des travaux de BLONDEL et al., 2012 ayant révélé plusieurs faiblesses méthodologiques, une refonte de cet indice a d'abord été proposée (SERÈNE, BATIOU-GUILHE, MAZZILLI, EMBLANCH et al., 2022). Celle-ci s'est appuyée sur l'analyse du spectre de fluorescence 3D de 289 échantillons provenant de 4 sources et 10 points d'écoulement en zone non saturée de l'observatoire de fontaine de Vaucluse LSBB. Du point de vue méthodologique, les principaux composés organiques fluorescents ont été identifiés sur la base d'une analyse²⁷ des échantillons, et de la bibliographie (Figure 3.17). Il s'agit du premier résultat de cette étude.

L'examen des données acquises a mis en évidence : (i) le caractère inadéquat des fenêtres de longueur d'onde d'émission de la fluorescence proposées dans l'index HIX pour la caractérisation de la matière organique dissoute présente dans les eaux étudiées (Figure 3.18), (ii) la nécessité d'une approche 3D pour la caractérisation de ces composés.

L'index d'humification proposé et baptisé TTi (Transit Time index) est similaire au HIX normalisé proposé par (OHNO, 2002) : ratio des composés humiques sur l'ensemble des humiques et protéiques. Mais une différence majeure réside dans la méthodologie d'identification des ces composés et de leurs intensités relatives, qui s'appuie sur les matrices de fluorescence 3D pour l'identification des composés et les intensités issues des composantes PARAFAC pour la quantification de leurs teneurs relatives.

L'analyse du comportement du traceur s'est effectuée en combinant des outils statistiques et l'analyse des séries temporelles. Les temps de séjour relatifs pouvant être inférés des distributions de TTi sur les différents points d'écoulement sont cohérents avec la dynamique relative connue des systèmes (sources de Millet, Saint Trinit, La Nesque), ce qui constitue un résultat encourageant quant à la pertinence de cet index pour la caractérisation des temps de séjour relatifs dans les systèmes à dynamique de transfert rapide.

27. de type parallel factor analysis (PARAFAC)

L'approche HIX s'appuie sur un pré-supposé fort qui est la stabilité des teneurs relatives des différents composés organiques fluorescents en entrée de l'hydrosystème. L'évaluation du domaine de validité de cette hypothèse, ses implications sur l'analyse des ratios de ces composés dans les eaux souterraines, et les éléments de correction éventuelle pouvant être apportés font l'objet d'un travail en cours (SERÈNE, MAZZILLI et al., 2022).

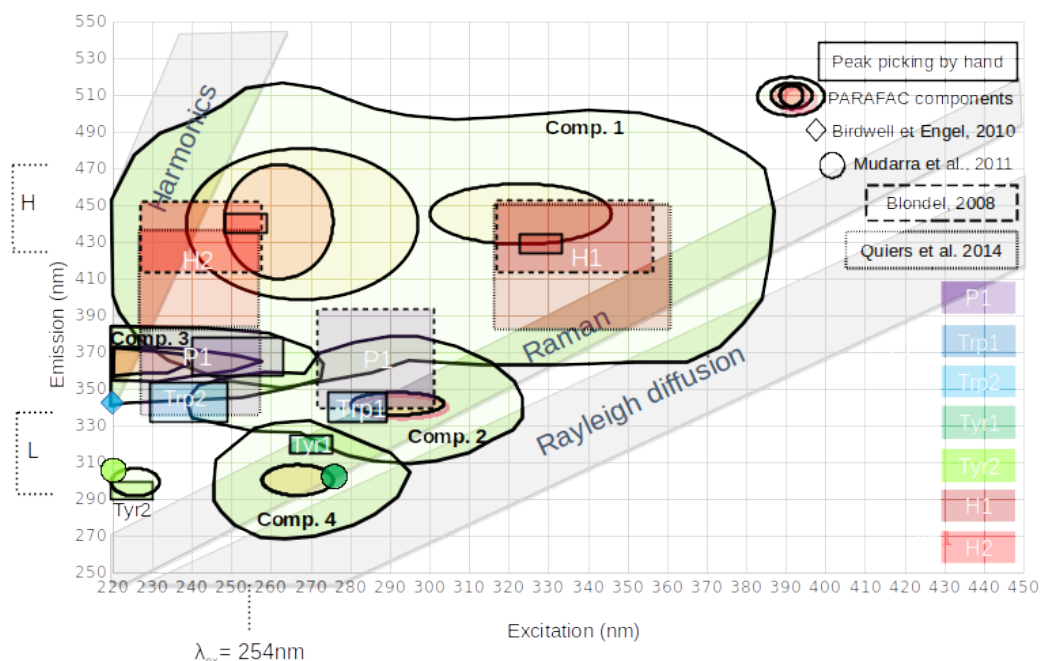


FIGURE 3.17 – Composés principaux de la MON : localisation dans la matrice d'excitation émission (i) des composants de l'analyse PARAFAC des échantillons analysés, et (ii) de composés identifiés dans la littérature. D'après SERÈNE, BATIOU-GUILHE, MAZZILLI, EMBLANCH et al., 2022.

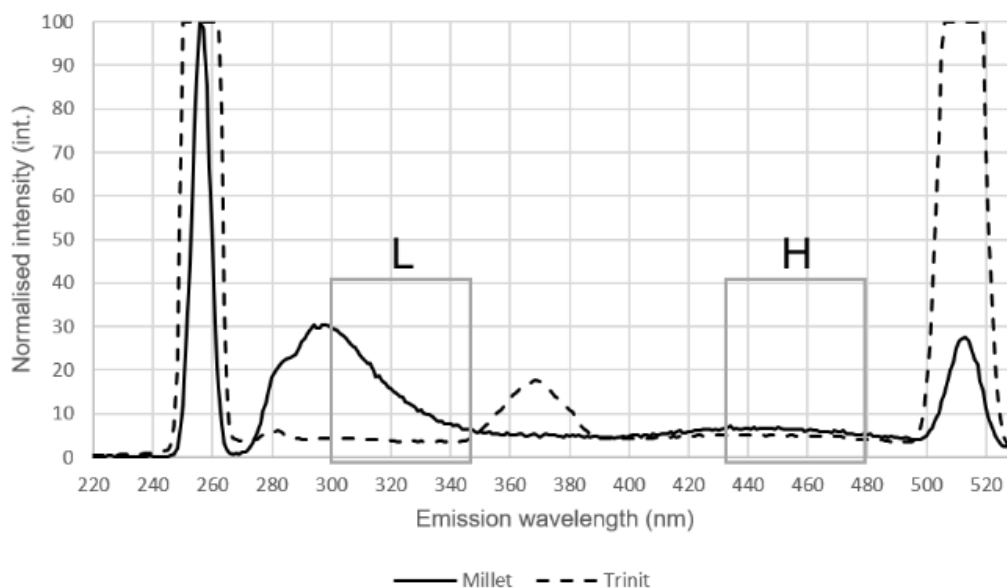


FIGURE 3.18 – Spectre 2D d'émission de deux échantillons représentatifs de notre étude pour la longueur d'onde d'excitation de 254 nm. Localisation des fenêtres H et L supposées correspondre respectivement aux fenêtres de fluorescence des familles d'humiques et de protéiques dans l'approche HIX. D'après SERÈNE, BATIOU-GUILHE, MAZZILLI, EMBLANCH et al., 2022.

3.2.5 Bilan des approches basées sur l'observation

L'observation du milieu naturel est une pièce fondamentale des avancées qui peuvent être réalisées dans la compréhension des processus hydrologiques. Elle doit être déclinée pour partie sur le long terme afin de documenter les évolutions graduelles induites par exemple par les évolutions climatiques ou les pollutions diffuses. Je me suis ainsi largement investie dans les activités d'observation, et particulièrement sur le site expérimental de fontaine de Vaucluse - LSBB (sections 1.3.4 et 3.2.1). En temps que productrice de données, j'assure la coordination et le développement des acquisitions autonomes, leur contrôle qualité ainsi que la conception et la mise en oeuvre de suivis originaux (par exemple le suivi temporel RMP présenté en Section 3.2.2).

L'hydrosystème de la fontaine de Vaucluse est associé à un karst à la fois extraordinaire et typique (sections 3.2.1 et 3.2.3) qui constitue une ressource en eau stratégique d'ampleur régionale. Ses caractéristiques physiques et les infrastructures de l'UAR LSBB en font un observatoire privilégié des transferts dans la zone non saturée. Dans ce contexte, les observations que j'ai pu mettre en place visaient à améliorer la caractérisation des transferts en zones non saturée et saturée, à différentes échelles spatiales. Ce sont des problématiques fondamentales, mais qui ont des implications assez directes sur la gestion qualitative et quantitative de la ressource en eau (par exemple : soutien d'étiage par les volumes capacitifs et peu transmissifs, vulnérabilité liée aux transferts rapides).

Comprendre les mécanismes de fonctionnement des hydrosystèmes nécessite de croiser des observations relevant de plusieurs disciplines. Développer voire seulement utiliser des outils variés nécessite cependant un investissement conséquent et l'appui de collaborateurs spécialistes. J'ai trouvé cet appui en interne à EMMAH (par ex. mes collègues Konstantinos Chalikakis et Christophe Emblanch pour les domaines de l'hydrogéophysique et du traçage naturel) et dans des laboratoires extérieurs (Anatoly Legchenko de l'UMR ISTerre a été un appui précieux pour les travaux présentés en section 3.2.2, tout comme Véronique Léonardi et Christelle Batiot-Guilhe de l'UMR HSM pour les approches de traçage artificiel et naturel respectivement)²⁸.

La finalisation des travaux présentés ici et leur intégration interdisciplinaire en lien avec la modélisation font l'objet des perspectives de recherche abordées en Section 4.1.

Ce travail d'observation s'inscrit dans un cadre collaboratif plus large lié aux Services Nationaux d'Observation H+ et KARST. Ces réseaux dynamiques sur le plan des échanges scientifiques apportent une ouverture indispensable à l'équilibre d'une approche de recherche basée sur un site d'étude spécifique (Figure 3.19). Une partie de mon activité est ainsi dévolue à l'exploitation collective des données acquises dans le cadre de ces réseaux, et à leur animation scientifique en particulier dans le cadre de KARST.

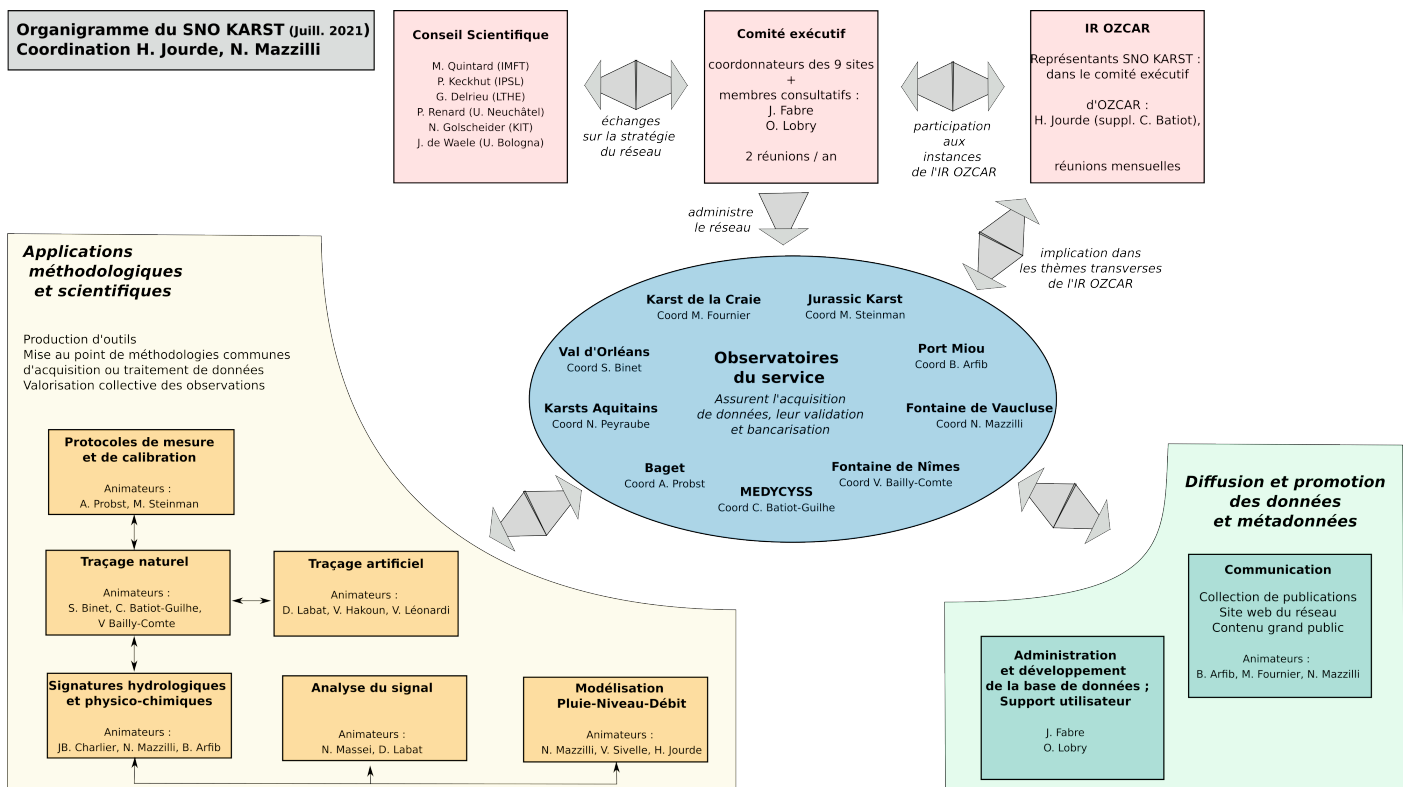


FIGURE 3.19 – Organigramme du SNO Karst en date de la dernière évaluation. Le nombre et périmètre des groupes de travail a évolué depuis la constitution du réseau en reflet de l'évolution des efforts de recherche et besoins méthodologiques.

28. les partenaires associés à des travaux non détaillés ici seront mentionnés en Section 4.1

Chapitre 4

Projet

Les perspectives de recherche envisagées ici couvrent deux axes. Le premier consiste en une poursuite des travaux de caractérisation des transferts en ZNS menés en particulier sur le site du LSBB (Section 4.1). Il s’agit de finaliser les travaux en cours, d’en réaliser une synthèse intégrant les résultats issus des travaux d’autres équipes, et de confronter données et modèle conceptuel à une modélisation numérique distribuée. Le second axe est plus prospectif (Section 4.2). Il correspond à des travaux pouvant être entrepris en collaboration avec l’UFRM avec pour support principal le bassin d’alimentation de fontaine de Vaucluse et visant la caractérisation et modélisation de l’impact de l’évolution du couvert végétal dans l’évolution de la ressource en eau souterraine.

Les approches d’observation et modélisation ont fait l’objet d’une présentation séparée en Chapitre 3, dans l’objectif de mettre en valeur leurs spécificités et favoriser la lisibilité du manuscrit. Ces deux approches se nourrissent pourtant mutuellement. Elles sont donc intégrées à chacun des axes de travail proposés ci-dessous.

4.1 Caractérisation et modélisation des écoulements en ZNS des aquifères carbonatés

Caractériser et modéliser les transferts en zone non saturée des carbonates nécessite le développement d’outils et d’approches dont certains ont pu être détaillés ci-dessus : colonnes de mesure adaptées à la gamme de débits des points d’écoulement (Section 3.2.1), suivis hydrogéophysiques permettant la caractérisation des stocks (Section 3.2.2), traceurs naturels innovants des temps de séjour (comme la matière organique naturelle, Section 3.2.4) et de l’origine des eaux (comme les éléments traces, travaux en cours illustrés en Figure 4.1), interprétation de diagraphies et essai d’obturation longue durée, prélèvements entre packers dans des horizons bien identifiés (travaux réalisés sur le site de Buissonnière, non présentés ici). La plupart de ces travaux devront être poursuivis et finalisés :

- analyse des chroniques haute fréquence de débit et conductivité acquises aux points d’écoulement du LSBB (travaux propres à l’observatoire), aboutissant à une caractérisation du comportement hydrodynamique et une compréhension plus fine de la dynamique temporelle des transferts,
- inversion de l’ensemble des sondages RMP disponibles sur le site de Buissonnière (travaux propres à l’observatoire), fournissant un ensemble de profils de teneur en eau couvrant une période de 2 ans à pas de temps mensuel a minima ainsi que des indications sur la présence d’eau superficielle et des indications qualitatives sur la porosité impliquée dans le stockage,
- analyse des signatures en éléments trace dans les eaux des points d’écoulement en ZNS du LSBB et sur les sources de l’hydrosystème de fontaine de Vaucluse (post-doctorat L. Serène envisagé à partir de l’automne 2023 en collaboration avec l’UM), permettant de préciser le lien entre lithologie et dynamique des écoulements.

Sur le site de Buissonnière, l’ensemble des informations issues de ces outils et approches est complété par les informations issues de travaux d’autres équipes et relatives à principalement la caractérisation de l’hétérogénéité géologique à différentes échelles et à l’évolution qualitative des saturations :

- description pétrophysique et mesures de porosité et perméabilité sur plugs réalisée par le CEREGE à partir de la carotte du forage Est, dans le cadre du projet Albion,
- campagnes de profils ERT réalisées dans le cadre de la thèse de Simon Carrière (CARRIÈRE et CHALIKAKIS, 2022),
- mesures GPR de surface réalisées dans le cadre de la thèse de Simon Carrière (CARRIÈRE, CHALIKAKIS et al., 2013) en collaboration avec l’UPPA, puis mesures GPR de surface, log, et tomographies radar réalisées par l’UPPA dans le cadre du projet Interwells et ayant fait l’objet d’une inversion en champ d’onde complet par ISTerre (SALCEDO et al., 2020, Figure 4.2),
- profil sismique réalisé par ISTerre dans le cadre du projet Interwells, et campagne de profils sismiques réalisée par l’IPGP dans le cadre d’un projet CRITEX (PASQUET, ROSAS-CARBAJAL et al., 2019),
- suivi mugraphique d’un an réalisé par l’IPGP dans le cadre d’un projet CRITEX (PASQUET, ROSAS-CARBAJAL et al., 2019),
- mesures différentielles de gravimétrie surface - profondeur réalisées par Géosciences Montpellier dans le cadre de ce même projet.

Ces éléments de caractérisation de la structure géologique, des propriétés pétrophysiques, et de l'évolution des teneurs en eau permettent d'envisager de proposer à l'échelle du site d'étude : (i) un modèle conceptuel des écoulements, puis (ii) une modélisation distribuée du fonctionnement hydrologique. Le modèle numérique développé viserait à tester les hypothèses de fonctionnement ayant pu être établies et à servir de base de réflexion pour l'élaboration de potentielles nouvelles expériences, en particulier en lien avec le rôle des éléments discrets drainants qui posent des difficultés d'imagerie spécifiques induisant un déficit de caractérisation.

A l'échelle du site du LSBB, des informations complémentaires sont également largement disponibles (cf Section 3.2.1). Les propriétés pétrophysiques des différentes séquences de dépôt (TENDIL, 2018) peuvent être traduites en termes d'horizons réservoir ou barrière aux écoulements (cf Figure 4.3), tandis que les évolutions de stock issues des suivis gravimétriques sont de nature à contraindre un modèle d'écoulement à l'échelle du massif¹. Ces données permettent d'envisager de proposer un modèle conceptuel puis numérique des écoulements s'appuyant sur l'ensemble des informations qualitatives ou quantitatives disponibles, ainsi que sur les concepts et approches de modélisation mises en oeuvre préalablement sur Buissonière.

L'intérêt de cette approche dépasse le site du LSBB car elle s'organise autour de la question centrale de la caractérisation et du rôle de l'hétérogénéité spatiale et temporelle des dépôts carbonatés et des éléments discrets (failles, conduits) dans la dynamique des écoulements (cf p.16). Le LSBB constitue cependant un élément central de l'approche développée, par la combinaison de ses caractéristiques géologiques (succession d'environnements de dépôts et contraste des propriétés pétrophysiques et hydrodynamiques des faciès afférents) et des moyens d'observations qui y sont déployés.

A plus long terme, la démarche proposée pose l'une des briques de la modélisation multi-physique qui sera nécessaire pour parvenir à une intégration complète des travaux réalisés.

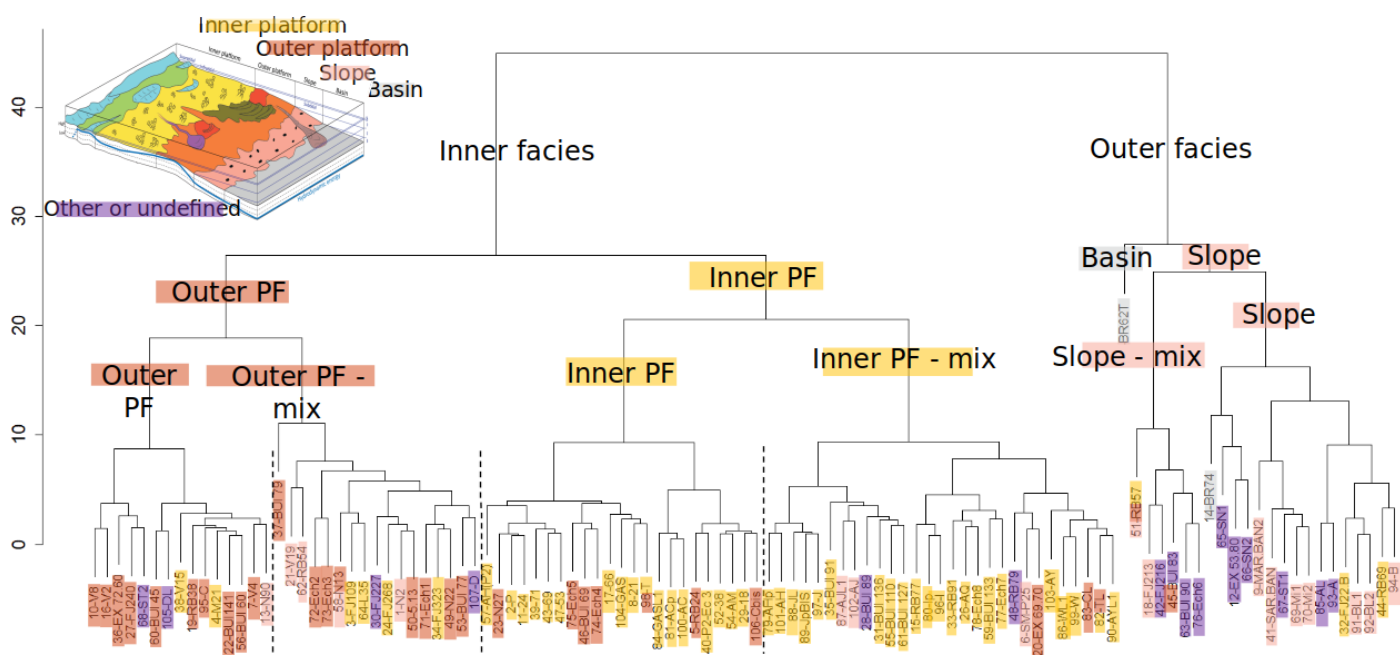


FIGURE 4.1 – Clustering hiérarchique mené sur 108 échantillons de carbonates prélevés sur le systèmes de fontaine de Vaucluse, à partir des teneurs en éléments trace suivants : Li, B, S, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Cd, Ba, Pb, U. Ce clustering fait apparaître un lien entre la signature en éléments trace et l'environnement de dépôt, laissant entrevoir la possibilité d'une signature des environnements de dépôt dans les eaux des aquifères carbonatés. D'après SERÈNE, BATIOU-GUILHE, MAZZILLI, LÉONIDE et al., 2022

1. échelle à laquelle les sondages RMP ne peuvent être déployés

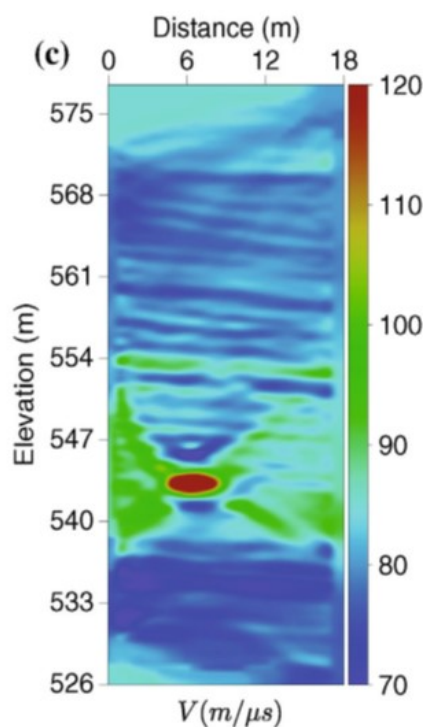


FIGURE 4.2 – Tomographie GPR : modèle de vitesse obtenu à partir d'une approche d'inversion par champ d'ondes complet. L'anomalie de forte vitesse de propagation correspond à la localisation du tunnel. D'après SALCEDO et al., 2020.

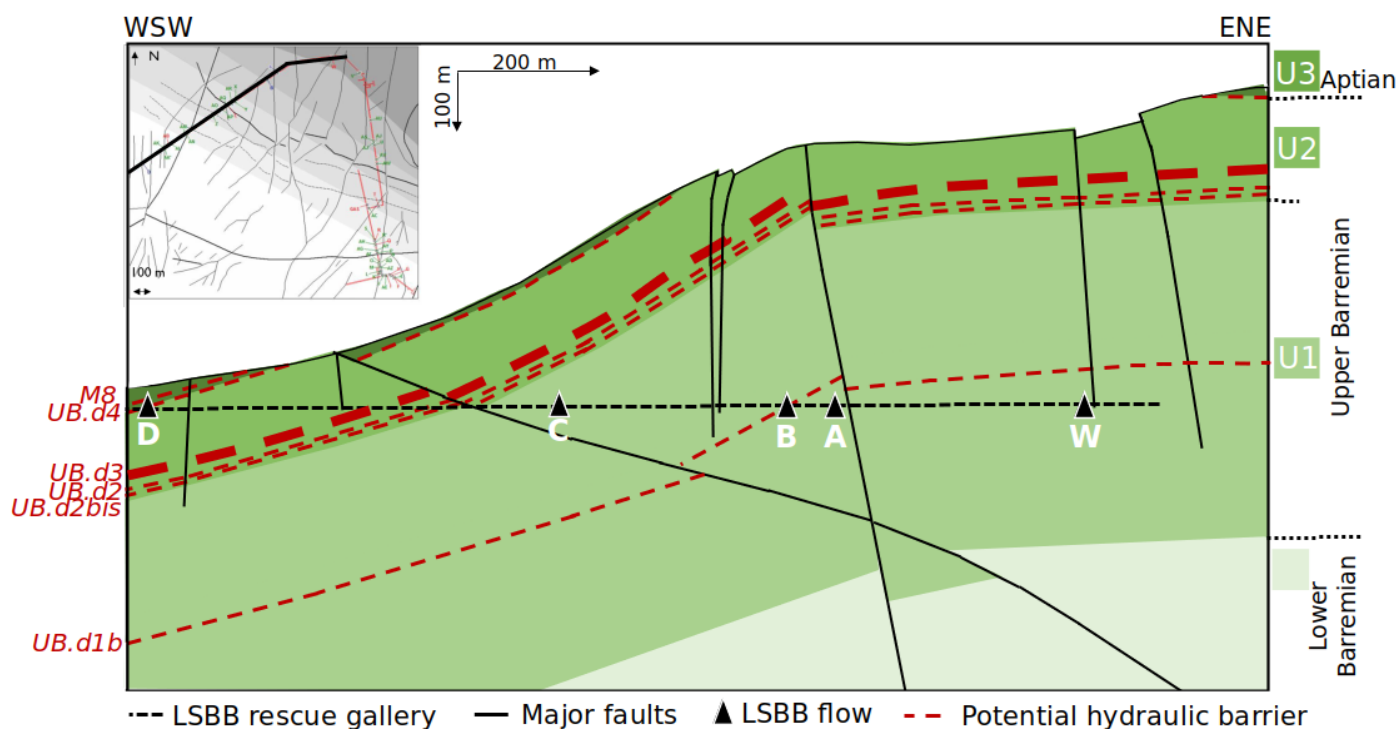


FIGURE 4.3 – Coupe à travers la "grande montagne" du LSBB et positions des points d'écoulement. Les principaux marqueurs de limite de séquence de dépôt supposés jouer le rôle de barrière hydraulique y sont reportés, ainsi que les failles principales. Coupe géologique modifiée d'après TENDIL, 2018 par L. Serene et M. Barbier.

4.2 Caractérisation et modélisation de l'impact de l'évolution du couvert végétal sur l'évolution de la ressource en eau souterraine

La recharge des aquifères est une composante clef de l'évaluation de la soutenabilité d'un schéma d'exploitation des eaux souterraines. Il s'agit d'un processus complexe, variable dans le temps et l'espace et qui dépend de facteurs climatiques, morphologiques, pédologiques et biotiques (SOPHOCLEOUS, 2004). Les variables explicatives de la variabilité de la recharge sont les variables climatiques ; cependant le couvert végétal et la structure du sol restent des facteurs qui ne peuvent être négligés (MOECK et al., 2020).

Les suivis hydrologiques de bassins ayant subi des changements rapides et importants de végétation offrent un aperçu de l'importance quantitative que peuvent avoir ces changements sur la recharge des aquifères. Par exemple au Niger, l'impact du remplacement du couvert naturel par des cultures a eu pour effet une augmentation de la recharge pouvant atteindre un facteur 10 lors de sécheresses sévères (SCANLON et al., 2006).

La déforestation s'accompagne en général d'une augmentation de la recharge (OWUOR et al., 2016 ; PECK et WILLIAMSON, 1987 ; PEI et al., 2022), pouvant atteindre deux ordres de grandeur dans le cas Australien (SCANLON et al., 2006). A contrario la destruction du couvert faisant suite à un incendie s'accompagne de la formation d'une croûte imperméable en surface du sol, qui peut temporairement réduire l'infiltration et ainsi avoir un effet négatif sur la recharge (JOHNK et MAYS, 2021). La gestion forestière est ainsi proposée comme un élément de mitigation de l'effet de sécheresses climatiques prolongées (LUO et al., 2018). Au-delà de leur impact quantitatif sur la recharge, les sols forestiers peuvent selon les contextes avoir un effet mitigateur des crues (TEMBATA et al., 2020) et favoriser le maintien d'un débit de base (PATTANAYAK et BUTRY, 2005). Tous ces mécanismes sont dépendant des contextes et leur effet net peut varier (CAO et al., 2022). Par ailleurs, les processus physiques et biogéochimiques dans les sols sont étroitement dépendants de la nature du couvert. L'évolution du couvert peut donc s'accompagner d'une évolution de la qualité des eaux infiltrées (CAO et al., 2022). Enfin, la disparition d'un couvert forestier sur une large échelle spatiale peut avoir des effets significatifs sur les variables climatiques (DUKU et HEIN, 2021 ; SPRACKLEN et GARCIA-CARRERAS, 2015).

Dans un article intitulé "Twenty-three unsolved problems in hydrology - a community perspective", BLÖSCHL et al., 2019 pointe le défi que représente le développement de modèles fiables hors de leur gamme d'observation, en particulier en ce qui concerne la dynamique de la végétation, et l'importance de considérer de façon couplée les interfaces de l'hydrosystème.

En effet, des changements massifs des couverts végétaux sont observés et à venir sous l'action combinée des activités anthropiques et du changement climatique. Par exemple, la hausse des températures moyennes et la sécheresse sont à l'origine d'infections généralisées des populations de pins d'Amérique du Nord (KURZ et al., 2008). Une augmentation de la mortalité des peuplements forestiers en réponse au changement climatique est probable y compris dans des environnements dans lesquels la ressource en eau n'est pas actuellement considérée comme limitante (H. HARTMANN et al., 2022). Cette mortalité peut avoir plusieurs causes : embolie hydraulique, famine de carbone, ravageurs, incendies (WILCOX, 2010). Elle est souvent plurifactorielle, les arbres physiologiquement affaiblis par des sécheresses successives étant par exemples plus vulnérables aux ravageurs. Elle a des implications profondes pour les cycles de l'eau et les cycles biogéochimiques (WILCOX, 2010).

Le bassin méditerranéen est particulièrement concerné par ces changements. Sécheresses, sur-exploitation, ravageurs et incendies y causent de façon synergique des dépérissements ou régression des massifs forestiers dans différents secteurs géographiques (PENUELAS et SARDANS, 2021). A l'horizon 2100, les scénarios climatiques correspondant à des émissions supérieures à la RCP 2.6 sont associées à une altération des écosystèmes inédite dans l'Holocène et à une extension substantielle des déserts et zones arides au Sud de l'Europe et Nord de l'Afrique (JOEL et CRAMER, 2016).

L'évaluation de la recharge future sur la base de paramètres climatiques seuls peut donc se révéler une approche inadéquate, et il est important de considérer les évolutions du couvert végétal. SAFT et al., 2016 indique par exemple que la capacité prédictive des modèles hydrologiques tend à diminuer quand les conditions climatiques évoluent dans la période de prédiction, en particulier lorsque cette évolution se fait vers des climats plus arides, du fait de la modification des processus hydrologiques clef : l'évolution du couvert et son impact sur les processus hydroécologiques doivent être considérés (cf Figure VOSE et al., 2011).

L'impluvium de fontaine de Vaucluse fait l'objet de fortes dynamiques écologiques. Un suivi des débits à l'exutoire du bassin est disponible depuis 1877. Cette époque correspond justement à la mise en oeuvre des premières opérations de Reboisement des Terrains de Montagne (RTM), motivée par un objectif de réduction du risque inondation. Le mont Ventoux est alors largement dénudé (NINGRE, 2007, Figure 4.5). Ces opérations sont à l'origine des peuplements forestiers actuellement impactés par le changement climatique : mortalité de sapins et pins sylvestres, dépérissements de chênes pubescents (GOURC, 2007 ; LEFÈVRE et al., 2020 ; MARTIN-GOUSSET et al., 2019). L'ensemble de ces changements sont documentés, ce qui offre la perspective d'un terrain d'essai pour une modélisation couplée de la dynamique des populations forestières (BUGMANN et SEIDL, 2022) et des processus hydrologiques. Un tel travail, s'il devait être mis en oeuvre, pourrait s'appuyer sur l'expertise développée à l'URFM. Un préalable en est l'évaluation de la stationnarité de la relation pluie - débit à fontaine de Vaucluse sur la période historique. Elle requiert l'évaluation et la prise en compte de l'incertitude sur ces sources de données et fera probablement l'objet d'un travail de master au printemps 2023.

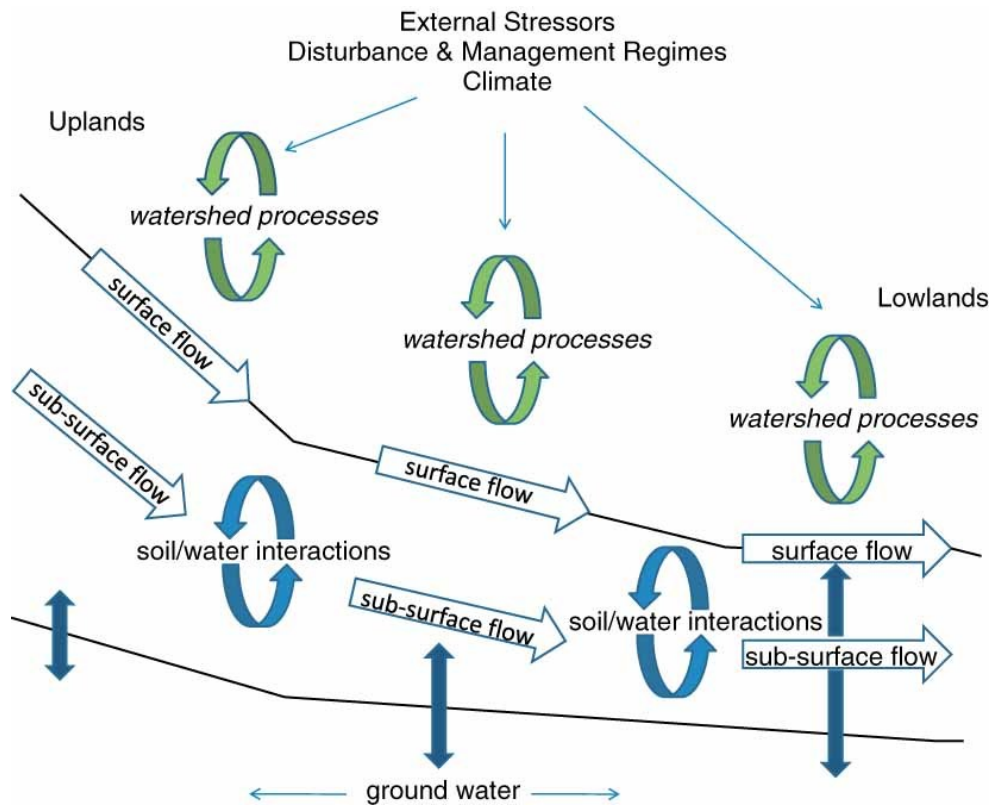


FIGURE 4.4 – Frontières de la science en hydroécologie : à l'échelle des paysages les impacts couplés du sol, de la végétation et du climat sur les processus d'écoulement de surface et sub-surface doivent être pris en compte, et intégrer les facteurs de stress externes aux systèmes. D'après VOSE et al., 2011.



FIGURE 4.5 – Changements de végétation historiques sur le bassin de fontaine de Vaucluse. Paysage dénudé, 6 juin 1903, Le Seuil - Vaucluse. Photo RTM d'après NINGRE, 2007.

Annexe A

Bibliographie

A.1 Contributions

A.1.1 ACL - (Articles à comité de lecture - Rang A)

- BARBEL-PÉRINEAU, A. et al. (2019). « Karst flow processes explored through analysis of long-term unsaturated-zone discharge hydrochemistry : a 10-year study in Rustrel, France ». In : *Hydrogeology Journal* 27.5, p. 1711-1723. DOI : [10.1007/s10040-019-01965-6](https://doi.org/10.1007/s10040-019-01965-6). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02082742>.
- BAUDEMONT, C., B. ARFIB, N. MAZZILLI et al. (2017). « Groundwater management of a highly dynamic karst by assessing baseflow and quickflow with a rainfall-discharge model (Dardennes springs, SE France) ». In : *Bulletin de la Société Géologique de France* 188.6, p. 40. DOI : [10.1051/bsgf/2017203](https://doi.org/10.1051/bsgf/2017203). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01687287> (cf. p. 22, 28).
- CARRIERE, S. et al. (2016). « The role of porous matrix in water flow regulation within a karst unsaturated zone : an integrated hydrogeophysical approach ». In : *Hydrogeology Journal* 24.7, p. 1905-1918. DOI : [10.1007/s10040-016-1425-8](https://doi.org/10.1007/s10040-016-1425-8). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01403396> (cf. p. 36, 37).
- CHAMPOLLION, C. et al. (2018). « Estimating epikarst water storage by time-lapse surface-to-depth gravity measurements ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 22.7, p. 3825-3839. DOI : [10.5194/hess-22-3825-2018](https://doi.org/10.5194/hess-22-3825-2018). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01843998>.
- CINKUS, G., N. MAZZILLI et H. JOURDE (2021a). « Identification of relevant indicators for the assessment of karst systems hydrological functioning : proposal of a new classification ». In : *Journal of Hydrology* 603, Part C, p. 127006. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2021.127006](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127006). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03390213>.
- CINKUS, G., N. MAZZILLI et H. JOURDE (2022b). « KarstID : An R Shiny application for the analysis of karst spring discharge time series and the classification of karst systems hydrological functioning ». In : *submitted to Water*.
- CINKUS, G., N. MAZZILLI, H. JOURDE, A. WUNSCH, T. LIESCH, Z. CHEN et al. (2022). « When best is the enemy of good – an example of counterbalancing errors inducing a counter-intuitive KGE performance assessment on two hydrological models ». In : *submitted to Hydrology and Earth System Sciences* (cf. p. 26, 27, 30).
- CINKUS, G., A. WUNSCH et al. (p. d.). « Comparison of Artificial Neural Networks and Reservoir models for simulating karst spring discharge ». In : *to be submitted to Hydrology and Earth System Sciences* () (cf. p. 26, 27, 30).
- DAL SOGLIO, L., C. DANQUIGNY, N. MAZZILLI, C. EMBLANCH et al. (2020a). « Modeling the Matrix-Conduit Exchanges in Both the Epikarst and the Transmission Zone of Karst Systems ». In : *Water* 12.11, p. 3219. DOI : [10.3390/w12113219](https://doi.org/10.3390/w12113219). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03014395>.
- (2020b). « Taking into Account both Explicit Conduits and the Unsaturated Zone in Karst Reservoir Hybrid Models : Impact on the Outlet Hydrograph ». In : *Water* 12.11, p. 3221. DOI : [10.3390/w12113221](https://doi.org/10.3390/w12113221). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03014383>.
- GAILLARDET, J., I. BRAUD et al. (2018). « OZCAR : The French Network of Critical Zone Observatories ». In : *Vadose Zone Journal* 17.1. Special Section : Hydrological Observatories, p. 1-24. DOI : [10.2136/vzj2018.04.0067](https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0067). URL : <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-01944414> (cf. p. 33).
- HAKOUN, V. et al. (2013). « Teaching groundwater flow processes : connecting lecture to practical and field classes ». In : *Earth System Science Data* 17.5, p. 1975-1984. DOI : [10.5194/hess-17-1975-2013](https://doi.org/10.5194/hess-17-1975-2013). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01317669>.
- JEANNIN, P.-Y., G. ARTIGUE, C. BUTSCHER, Y. CHANG, J.-B. CHARLIER, L. DURAN, L. GILL, A. HARTMANN, A. JOHANNET, H. JOURDE, A. KAVOUSI, T. LIESCH, Y. LIU, M. LÜTHI et al. (2021). « Karst modelling challenge 1 : Results of hydrological modelling ». In : *Journal of Hydrology* 600, p. 126508. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2021.126508](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126508). URL : <https://hal.mines-ales.fr/hal-03265800>.
- JOURDE, H., A. LAFARE, N. MAZZILLI et al. (2014). « Flash flood mitigation as a positive consequence of anthropogenic forcing on the groundwater resource in a karst catchment ». In : *Environmental Earth Sciences* 71.2, p. 573-583. DOI : [10.1007/s12665-013-2678-3](https://doi.org/10.1007/s12665-013-2678-3). URL : <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01174209>.
- JOURDE, H., N. MASSEI et al. (2018). « SNO KARST : A French Network of Observatories for the Multidisciplinary Study of Critical Zone Processes in Karst Watersheds and Aquifers ». In : *Vadose Zone Journal* 17.1. (IF 3.63; Q1). DOI : [10.2136/vzj2018.04.0094](https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0094). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01966716> (cf. p. 33).

- KAZAKIS, N., K. CHALIKAKIS et al. (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 ». In : *Science of the Total Environment* 643. Participation du KARST observatory network (SNO KARST), p. 592-609. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2018.06.184](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.184). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01832703> (cf. p. 22, 28).
- LABAT, D., R. ARGOUZE et al. (2022). « Impact of Withdrawals on Karst Watershed Water Supply ». In : *Water* 14.9. ISSN : 2073-4441. DOI : [10.3390/w14091339](https://doi.org/10.3390/w14091339). URL : <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/9/1339> (cf. p. 22, 30).
- MAZZILLI, N., M. BOUCHER, K. CHALIKAKIS, A. LEGCHENKO, H. JOURDE et C. CHAMPOLLION (2016). « Contribution of magnetic resonance soundings for characterizing water storage in the unsaturated zone of karst aquifers ». In : *Geophysics* 81.4. Read More : <http://library.seg.org/doi/10.1190/geo2015-0411.1>, WB49-WB61. DOI : [10.1190/geo2015-0411.1](https://doi.org/10.1190/geo2015-0411.1). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01412654> (cf. p. 36).
- MAZZILLI, N., K. CHALIKAKIS, S. CARRIÈRE et al. (2020). « Surface Nuclear Magnetic Resonance Monitoring Reveals Karst Unsaturated Zone Recharge Dynamics during a Rain Event ». In : *Water* 12.11, p. 3183. DOI : [10.3390/w12113183](https://doi.org/10.3390/w12113183). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03010248> (cf. p. 36-38).
- MAZZILLI, N., V. GUINOT et H. JOURDE (2010a). « Sensitivity analysis of two-dimensional steady-state aquifer flow equations. Implications for groundwater flow model calibration and validation ». In : *Advances in Water Resources* 33.8, p. 905-922. DOI : [10.1016/j.advwatres.2010.04.014](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.04.014). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00804654>.
- MAZZILLI, N., V. GUINOT et H. JOURDE (2012b). « Sensitivity analysis of conceptual model calibration to initialisation bias. Application to karst spring discharge models ». In : *Advances in Water Resources* 42, p. 1-16. DOI : [10.1016/j.advwatres.2012.03.020](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.020). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00804648> (cf. p. 24, 25).
- MAZZILLI, N., V. GUINOT, H. JOURDE et al. (2019). « KarstMod : A modelling platform for rainfall - discharge analysis and modelling dedicated to karst systems ». In : *Environmental Modelling and Software* 122. (IF 4.55 [2018]; Q1), p. 103927. DOI : [10.1016/j.envsoft.2017.03.015](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.015). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01685224> (cf. p. 28).
- MAZZILLI, N., H. JOURDE, T. JACOB et al. (2013). « On the inclusion of ground-based gravity measurements to the calibration process of a global rainfall-discharge reservoir model : case of the Durzon karst system (Larzac, southern France) ». In : *Environmental Earth Sciences* 68.6, p. 1631-1646. DOI : [10.1007/s12665-012-1856-z](https://doi.org/10.1007/s12665-012-1856-z). URL : <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00812624> (cf. p. 24, 30).
- OLARINOYE, T. et al. (2020). « Global karst springs hydrograph dataset for research and management of the world's fastest-flowing groundwater ». In : *Scientific Data* 7.1, 9 pages. DOI : [10.1038/s41597-019-0346-5](https://doi.org/10.1038/s41597-019-0346-5). URL : <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-02524019>.
- OLLIVIER, C., K. CHALIKAKIS et al. (2019). « Challenges and Limitations of Karst Aquifer Vulnerability Mapping Based on the PaPRIKa Method-Application to a Large European Karst Aquifer (Fontaine de Vaucluse, France) ». In : *Environments* 6.3. DOI : [10.3390/environments6030039](https://doi.org/10.3390/environments6030039). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02080741>.
- OLLIVIER, C., Y. LECOMTE et al. (2019). « A QGIS Plugin Based on the PaPRIKa Method for Karst Aquifer Vulnerability Mapping ». In : *Groundwater* 57.2, p. 201-204. DOI : [10.1111/gwat.12855](https://doi.org/10.1111/gwat.12855). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02004758>.
- OLLIVIER, C., N. MAZZILLI, A. OLIOSO et al. (2020). « Karst recharge-discharge semi distributed model to assess spatial variability of flows ». In : *Science of the Total Environment* 703, p. 134368. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2019.134368](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134368). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02309565> (cf. p. 22, 30).
- OLLIVIER, C., A. OLIOSO, S. D. CARRIÈRE et al. (2021). « An evapotranspiration model driven by remote sensing data for assessing groundwater resource in karst watershed ». In : *Science of the Total Environment* 781, p. 146706. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2021.146706](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146706). URL : <https://hal.inrae.fr/hal-03203364> (cf. p. 30).
- POULAIN, A. et al. (2018). « Assessment of groundwater recharge processes through karst vadose zone by cave percolation monitoring ». In : *Hydrological Processes* 32.13, p. 2069-2083. DOI : [10.1002/hyp.13138](https://doi.org/10.1002/hyp.13138). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01819762> (cf. p. 28).
- SERÈNE, L., C. BATIOU-GUILHE, N. MAZZILLI, C. EMBLANCH et al. (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) ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 26, p. 5035-5049. DOI : [10.5194/hess-2022-100](https://doi.org/10.5194/hess-2022-100). URL : <https://doi.org/10.5194/hess-26-5035-2022> (cf. p. 43, 44).
- SERÈNE, L., N. MAZZILLI et al. (2022). « Transit time index (TTi) based on organic matter fluorescence : temporal variability of fluorescent compounds and TTi in springs and unsaturated zone flows from karst natural and anthropic catchments ». In : *in prep.* (Cf. p. 43, 44).
- SIVELLE, V., H. JOURDE, D. BITTNER et al. (2021). « Assessment of the relative impacts of climate changes and anthropogenic forcing on spring discharge of a Mediterranean karst system ». In : *Journal of Hydrology* 598, p. 126396. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2021.126396](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126396). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03216522> (cf. p. 22, 28).
- SIVELLE, V., D. LABAT et al. (2019). « Dynamics of the Flow Exchanges between Matrix and Conduits in Karstified Watersheds at Multiple Temporal Scales ». In : *Water* 11.3. (IF 2.52 [2018]; Q1), p. 569. DOI : [10.3390/w11030569](https://doi.org/10.3390/w11030569). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02076363> (cf. p. 22, 28).
- WUNSCH, A., T. LIESCH et al. (2022). « Karst spring discharge modeling based on deep learning using spatially distributed input data ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 26, p. 2405-2430. DOI : [10.5194/hess-26-2405-2022](https://doi.org/10.5194/hess-26-2405-2022). URL : <https://hess.copernicus.org/articles/26/2405/2022/hess-26-2405-2022.pdf> (cf. p. 30).

A.1.2 ACLN - Publications dans des revues à comité de lecture non répertoriées dans les bases internationales

- GRANDJOUAN, O. et al. (2017). « Las resurgencias del Alto Mayo (San Martin, Perú) : estudio hidrológico sobre un karst tropical andino-amazónico ». In : *Boletín de la Sociedad geologica del Perú* 8, p. 083-096. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01846309>.
- JOURDE, H., N. MAZZILLI, N. MASSEI et al. (2018). « Le Service National d’Observation du KARST (SNO KARST) ». In : *Géologues* 195, p. 38-42. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01846314>.
- LABAT, D., N. MAZZILLI et al. (p. d.). « Le Service National d’Observation Karst : pour un suivi à long terme des aquifères karstiques face aux nouveaux extrêmes climatiques ». In : *soumis à Karstologia* ().
- MASSEI, N., D. LABAT et al. (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 ». In : *Géologues*. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01846316>.
- MAZZILLI, N., D. LABAT et al. (2018). « KarstMod, une plateforme dédiée à la modélisation pluie-niveau-débit des aquifères karstiques ». In : *Géologues* 195, p. 43-45. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01846311>.
- SÁNCHEZ, L. S. H. et al. (2018). « Un observatoire des résurgences karstiques de l’Alto Mayo, versant Amazonien des Andes du Nord Pérou ». In : *Géologues* 195, p. 60-63. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01846315>.

A.1.3 C-ACTI - Communications avec actes dans un congrès international

- BERTRAND, M., S. DENIMAL et al. (2022). « Identification of the origin and type of flow in a karst under cover (Barrois limestone; Meuse) : contribution of hydrochemical and geophysical coupling ». In : *Eurokarst 2022 - The European Conference on Karst Hydrogeology and Carbonate Reservoirs*. Malaga, Spain. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03751675> (cf. p. 36, 37).
- BERTRAND, M., R. VALOIS et al. (oct. 2021). « Groundwater fast drainage dynamics in the Barrois limestones ; evidences from an MRS monitoring ». In : *8th International Workshop on Magnetic Resonance*. Strasbourg, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03647792>.
- CHALIKAKIS, K., S. D. C. CARRIERE et al. (sept. 2014). « Water in karst hydrosystems unsaturated zone ; MRS evidences within an integrated hydrogeophysical approach ». In : *20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Athènes, Greece. DOI : 10.3997/2214-4609.20142013. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01315380>.
- DAL SOGLIO, L., C. DANQUIGNY, N. MAZZILLI et G. MASSONNAT (sept. 2016). « Sensitivity analysis of hydrodynamics response to structure and flow parameters in a karstic reservoir ». In : *Eurokarst 2016*. Neuchâtel, Switzerland. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844626>.
- GIGLEUX, S. et al. (juil. 2018). « Characterization of a karstic hydrosystem by a multidisciplinary approach : the case of the Barrois limestones ». In : *Eurokarst 2018*. Besançon, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844630>.
- JOURDE, H., N. MAZZILLI, N. LECOQ et al. (oct. 2014). « Karstmod - A generic modular reservoir model dedicated to spring discharge modeling and hydrodynamic analysis in karst ». In : *5th International Symposium on Karst*. Malaga, Spain. URL : <https://hal-normandie-univ.archives-ouvertes.fr/hal-01777570>.
- JOURDE, H., A. LAFARE et N. MAZZILLI (sept. 2011). « Flash flood mitigation in a karst catchment as a positive consequence of anthropogenic forcings on the groundwater resource ». In : *H2 Karst*. Besançon, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844600>.
- KAZAKIS, N., C. OLLIVIER et al. (juil. 2018). « Groundwater vulnerability assessment in the Strategic Greek Karst Aquifer of Damasi Titanos using QGIS PaPRIKa plugin ». In : *Eurokarst 2018*. Besançon, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844640>.
- LEGTCHENKO, A. et al. (juin 2015). « MRS inversion for water volume ». In : *6th International Workshop on Magnetic Resonance*. Aarhus, Denmark. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844617> (cf. p. 36).
- MAZZILLI, N., M. BOUCHER, K. CHALIKAKIS, A. LEGCHENKO, H. JOURDE, F. CARRIERE et al. (sept. 2012). « Field evidence of water storage changes in the unsaturated zone of karst using MRS ». In : *5th Conference on Magnetic Resonance in the subsurface*. Hannover, Germany. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01338708>.
- MAZZILLI, N., S. D. CARRIERE et al. (mai 2012). « MRS applicability for the characterisation of the unsaturated zone of karst hydrosystems : First results from the LSBB site (Rustrel, France) ». In : *iDUST 2012*. Apt, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844556>.
- MAZZILLI, N., V. GUINOT et H. JOURDE (mai 2010b). « Sensitivity Analysis of 2D steady-state aquifer flow equations : Implications for groundwater flow model calibration and monitoring network design ». In : *SimHydro*. Nice, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844597>.
- MAZZILLI, N., H. JOURDE, V. GUINOT et al. (sept. 2011). « Hydrological modelling of a karst aquifer under active groundwater management using a parsimonious conceptual model ». In : *H2Karst*. Besançon, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844603> (cf. p. 22, 30).
- MAZZILLI, N., G. VINCENT et al. (sept. 2011). « Sensitivity analysis of conceptual model calibration to initialisation bias. Application to karst spring discharge models ». In : *ModelCare*. Leipzig, Germany. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844551>.
- MOUYEN, M. et al. (juin 2018). « Geodetic tools for monitoring groundwater redistributions ». In : *iDUST 2018*. Avignon, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844589>.

- MOUYEN, M. et al. (2019). « Monitoring of groundwater redistribution in a karst aquifer using a superconducting gravimeter ». In : *E3S Web of Conferences*. i-DUST 2018 – Inter-Disciplinary Underground Science and Technology 88, p. 03001. DOI : [10.1051/e3sconf/20198803001](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198803001). URL : <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-02047518>.
- OLLIVIER, C., C. DANQUIGNY et al. (oct. 2014b). « Contribution of hydrogeological time series statistical analysis to the study of karst unsaturated zone (Rustrel, France) ». In : *5th International Symposium on Karst*. Malaga, Spain. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01318950>.
- OLLIVIER, C., A. OLIOSO, N. MAZZILLI, K. CHALIKAKIS, C. VELLUET et al. (juil. 2018). « Estimation of recharge in karst aquifer using improved evapotranspiration monitoring thanks to remote sensing data ». In : *Eurokarst 2018*. Besançon, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844642>.
- SERÈNE, L., C. BATIOU-GUILHE, N. MAZZILLI, P. LÉONIDE et al. (2022). « Use of trace elements to distinguish flows from different types of carbonated rocks ». In : *IAHS-AISH Scientific Assembly 2022*. Montpellier, France. URL : <https://doi.org/10.5194/iahs2022-329> (cf. p. 47).
- SERENE, L. et al. (2022). « Transit Time index (TTi) as an adaptation of humification index to illustrate hydrodynamic and transit time differences of karst springs. Application to the karst springs of Fontaine de Vaucluse system ». In : *Eurokarst 2022 - The European Conference on Karst Hydrogeology and Carbonate Reservoirs*. Malaga, Spain. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03751669>.
- SIVELLE, V., H. JOURDE, G. CINKUS et al. (2022). « A methodology to assess the sensitivity of karst groundwater resources to climate change and anthropogenic pressures ». In : *Eurokarst 2022 - The European Conference on Karst Hydrogeology and Carbonate Reservoirs*. Malaga, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03751657>.

A.1.4 C-COM - Communications orales sans actes dans un congrès national ou international

- BAUDEMONT, C., B. ARFIB et N. MAZZILLI (jan. 2017). « La modélisation Pluie-Débit du système karstique de Dardennes avec la plateforme KarstMod. » In : *Congrès RIKRAK, Association Française de Karstologie*. Sault, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03331956>.
- CHALIKAKIS, K., N. MAZZILLI et al. (août 2021). « Groundwater dynamics in karst hydrosystem unsaturated zone; evidences from a 2-years Surface Nuclear Magnetic Resonance monitoring ». In : *Near Surface Geosciences 2021 - 1rst Conference on Hydrogeophysics*. Bordeaux, France. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-03589919>.
- CINKUS, G., N. MAZZILLI, H. JOURDE, A. WUNSCH, T. LIESCH, N. GOLDSCHIEDER et al. (mai 2022). « Possible bias in the assessment of karst hydrological model performance. Example of alpha and beta parameters compensation when using the KGE as performance criterion. » In : *EGU General Assembly 2022*. Vienna, Austria. URL : <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-5149> (cf. p. 26, 27).
- CINKUS, G., N. MAZZILLI et H. JOURDE (avr. 2021b). « Proposal of a typology of karst systems functioning based on relevant indicators of karst springs hydrodynamics ». In : *EGU General Assembly 2021*. vEGU21 : Gather Online. URL : <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-4009>.
- DAL SOGLIO, L., C. DANQUIGNY, G. MASSONNAT et al. (sept. 2019). « New insights into karst genesis processes in unsaturated zone thanks to process-like modelling ». In : *46th IAH Congress*. Malaga, Spain. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02340340>.
- LE MESNIL, M. et al. (sept. 2014). « Karst conduits modeling using ODSIM - An application case in the Fontaine-de-Vaucluse watershed ». In : *34th Gocad Meeting*. Nancy, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844577>.
- LECOQ, N. et al. (oct. 2014). « Karstmod - A generic modular reservoir model dedicated to spring discharge modeling and hydrodynamic analysis in karst ». In : *3e Colloque International Eau Climat 2014 : REGARDS CROISES NORD - SUD*. Hammamet, Tunisia. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01318608>.
- MASSEI, N., D. LABAT et al. (avr. 2017). « Hydrological response of karst systems to large-scale climate variability for different catchments of the French karst observatory network INSU/CNRS SNO KARST ». In : *EGU General Assembly*. T. 19. Vienne, Austria, p. 18026. URL : <https://hal-normandie-univ.archives-ouvertes.fr/hal-01777565>.
- MAZZILLI, N., K. CHALIKAKIS, M. BOUCHER et al. (sept. 2012). « MRS applicability for the characterisation of the unsaturated zone of karst hydrosystems ». In : *Near Surface Geoscience 2012*. Paris, France, 29 p. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-02807976>.
- MAZZILLI, N., K. CHALIKAKIS, C. EMBLANCH et al. (sept. 2019). « Hydrogeological and hydrogeophysical insights into karst aquifer unsaturated zone. Challenges and limits. » In : *46th IAH congress*. Malaga, Spain. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02303609>.
- MAZZILLI, N. et H. JOURDE (sept. 2016). « The SNO Karst : a french collaborative network for karst observation and knowledge-sharing ». In : *1st simposio internacional del Karst*. Tarapoto, Peru. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844584>.
- MAZZILLI, N., H. JOURDE, N. LECOQ et al. (oct. 2014). « KARSTMOD - A generic modular reservoir model dedicated to spring discharge modeling and hydrodynamic analysis in karst ». In : *24th Earth Sciences Meeting*. Pau, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844613>.

- OLIOSO, A., A. ALLIES, C. OLLIVIER, C. VELLUET, E. DELOGU et al. (nov. 2017). « Suivi de l'évapotranspiration par télédétection spatiale pour l'évaluation des ressources hydrogéologiques ». In : *Journées de Modélisation du Fonctionnement des Surfaces Continentales*. Montpellier, France. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-03590416>.
- OLIOSO, A., A. ALLIES, C. OLLIVIER, C. VELLUET, M. LEBLANC et al. (mai 2018). « Monitoring evapotranspiration from remote sensing data for groundwater resources evaluation. » In : *Remote Sensing & Hydrology Symposium 2018. Earth Observation for Integrated Water and Basin Management : New Possibilities and Challenges for Adaptation to a Changing Environment*. Cordoba, Spain. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-03589490>.
- OLLIVIER, C., N. MAZZILLI, C. DANQUIGNY et al. (sept. 2016). « Semi-distributed lumped model to assess recharge of karst unsaturated zone ». In : *43rd IAH congress*. Montpellier, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844585>.
- OLLIVIER, C., A. OLIOSSO, N. MAZZILLI, K. CHALIKAKIS, C. EMBLANCH et al. (avr. 2019). « KaRaMel : a semi-distributed Rainfall-Recharge-Discharge model to assess the spatial variability of flows in karst aquifers ». In : *EGU General Assembly 2019*. Vienna, Austria. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02115210>.
- PASQUET, S., M. ROSAS CARBAJAL et al. (avr. 2019). « From CRITEX to OZCAR : Geophysical wandering across the French Critical Zone Observatoire ». In : *EGU General Assembly 2019*. Vienna, Austria. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02115194>.
- PASQUET, S., M. ROSAS-CARBAJAL et al. (déc. 2019). « Combined Muon, Seismic and Electrical Resistivity Measurements to Characterize a Karstic Unsaturated Zone (LSBB, France) ». In : *AGU Fall Meeting 2019*. San Francisco, United States. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02364484> (cf. p. 46).
- SIVELLE, V., H. JOURDE, N. MAZZILLI et al. (avr. 2021). « Relative impacts of climate change and anthropogenic forcing on karst spring discharge forecasting of a Mediterranean catchment ». In : *EGU General Assembly 2021*. vEGU21 : Gather Online. URL : <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-4150>.
- WUNSCH, A., L. T. et al. (mai 2022). « Karst spring discharge modeling based on deep learning using spatially distributed input data ». In : *EGU General Assembly 2022*. Vienna, Austria. URL : <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-3825>.

A.1.5 COS - Chapitres d'ouvrage scientifique (incl. book of proceedings)

- JOURDE, H., C. BATIOU-GUILHE et al. (2011). « The MEDYCYSS observatory, a Multi scalE observatory of flood dYnamiCs and hYdrodynamicS in karSt (Mediterranean border Southern France) ». In : *Advances in the Research of Aquatic Environment*. Sous la dir. de N. LAMBRAKIS et al. T. 1. Environmental Earth Sciences. Springer, p. 551-560. DOI : [10.1007/978-3-642-19902-8_65](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19902-8_65). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844069>.
- JOURDE, H., N. MAZZILLI, N. LECOQ et al. (2015). « KARSTMOD : A Generic Modular Reservoir Model Dedicated to Spring Discharge Modeling and Hydrodynamic Analysis in Karst ». In : *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. Springer Berlin Heidelberg, p. 339-344. DOI : [10.1007/978-3-642-17435-3_38](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17435-3_38). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01457501>.
- MAZZILLI, N., M. BOUCHER, K. CHALIKAKIS, A. LEGCHENKO, H. JOURDE, S. CARRIÈRE et al. (sept. 2012). « MRS study of water content variations in the unsaturated zone of a karst aquifer (southern France) ». In : *5th Conference on Magnetic Resonance in the subsurface*. Hanovre, Germany, 31 p. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-02747789>.
- MAZZILLI, N., V. GUINOT et H. JOURDE (sept. 2011). « Investigation of the behaviour of two karst spring discharge reservoir models with respect to the initialization bias ». In : *ModelCARE 2011 Conference*. T. 355. Models - Repositories of Knowledge. Leipzig, Germany : IAHS International Association of Hydrological Sciences. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-02744516>.
- (2012a). « Investigation of the behaviour of two karst spring discharge reservoir models with respect to the initialization bias. » In : *In : Models - Repositories of Knowledge. S.E. Oswald, O. Kolditz and S. Attinger (Editors), IAHS Publication. Int Assoc Hydrological Sciences, Wallingford, pp. 27-33*. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01844029>.
- OLLIVIER, C., C. DANQUIGNY et al. (2014a). « Contribution of Hydrogeological Time Series Statistical Analysis to the Study of Karst Unsaturated Zone (Rustrel, France) ». In : *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. Andreo, B., Carrasco, F., Durán, J.J., Jiménez, P. and LaMoreaux, J.W. (eds), Springer Berlin Heidelberg, pp. 27-33. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01318956>.
- ROCHE, I. L. et al. (jan. 2022). « Water resource management : the multi-technique approach of LSBB and its muon detection projects (chapter 7) ». In : *Muography : Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles Geophysical Monograph Series - ISBN-13* : American Geophysical Union. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03453118>.

A.1.6 AP - Autres productions

- CINKUS, G., N. MAZZILLI et H. JOURDE (2022a). « KarstID User Guide – version 0.0.0.9000 ». working paper or preprint. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03688332>.
- MAZZILLI, N. et D. BERTIN (2019). « KarstMod User Guide - version 2.2 ». working paper or preprint. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01832693> (cf. p. 28).
- MAZZILLI, N., C. OLLIVIER et al. (2022). « Guidebook for IAH FIELD TRIP 4 – THE FONTAINE DE VAUCLUSE KARSTIC SPRING. 43rd IAH congress, 25-29 sept. 2016 ». guidebook (cf. p. 28, 29, 34).

A.2 Autres références

- ADAMS, H. D. et al. (2017). « A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality ». In : *Nature ecology & evolution* 1.9, p. 1285-1291.
- AKBAR, M. et al. (2000). « A snapshot of carbonate reservoir evaluation ». In : *Oilfield review* 12.4, p. 20-21 (cf. p. 17).
- ALLEY, W. M. et al. (2002). « Flow and Storage in Groundwater Systems ». In : *Science* 296.5575, p. 1985-1990. DOI : [10.1126/science.1067123](https://doi.org/10.1126/science.1067123). URL : <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1067123> (cf. p. 15).
- AUDRA, P. et A. PALMER (mar. 2013). « The Vertical Dimension of Karst : Controls of Vertical Cave Pattern ». In : *Treatise on Geomorphology* 6, p. 186-206. DOI : [10.1016/B978-0-12-374739-6.00098-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00098-1) (cf. p. 18).
- BAILLY-COMTE, V. et S. PISTRE (avr. 2021). « A parsimonious approach for large-scale tracer test interpretation ». In : *Hydrogeology Journal* 29, p. 1-12. DOI : [10.1007/s10040-021-02327-x](https://doi.org/10.1007/s10040-021-02327-x) (cf. p. 40).
- BARRIQUAND, L. et al. (2021). « Caves and bats : Morphological impacts and archaeological implications. The Azé Prehistoric Cave (Saône-et-Loire, France) ». In : *Geomorphology* 388, p. 107785. ISSN : 0169-555X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107785>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X21001938> (cf. p. 17).
- BATIOT, C. et al. (2003). « Carbone organique total (COT) et magnésium (Mg²⁺) : deux traceurs complémentaires du temps de séjour dans l'aquifère karstique ». In : *Comptes Rendus Geoscience* 335.2, p. 205-214. ISSN : 1631-0713. DOI : [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(03\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(03)00027-0) (cf. p. 43).
- BAYLE, B. et D. GRAILLOT (1987). « Fontaine de Vaucluse. Compte rendu hydrogéologique de l'opération Spélénaute du 2 août 1985 ». In : *Karstologia* 9, p. 1-6. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01315384> (cf. p. 34).
- BEVEN, K. et J. FREER (2001). « Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology ». In : *Journal of Hydrology* 249.1, p. 11-29. ISSN : 0022-1694. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00421-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00421-8). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169401004218> (cf. p. 24).
- BEZES, C. (1976). « Contribution a la modélisation des systèmes aquifères karstiques [Contribution to the modelling of karst systems] ». Theses. Université des Sciences et Techniques du Languedoc Montpellier, France (cf. p. 23).
- BIERKENS, M. F. P. et Y. WADA (2019). « Non-renewable groundwater use and groundwater depletion : a review ». In : *Environmental Research Letters* 14.6, p. 063002. DOI : [10.1088/1748-9326/ab1a5f](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f). URL : <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f> (cf. p. 15).
- BINLEY, A. et al. (2015). « The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales ». In : *Water Resources Research* 51.6, p. 3837-3866. DOI : <https://doi.org/10.1002/2015WR017016>. eprint : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2015WR017016>. URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015WR017016> (cf. p. 36).
- BITTNER, D. et al. (2020). « Identifying relevant hydrological and catchment properties in active subspaces : An inference study of a lumped karst aquifer model ». In : *Advances in Water Resources* 135, p. 103472. ISSN : 0309-1708. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103472>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170819306700> (cf. p. 22).
- BLONDEL, T. et al. (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) ». In : *Environmental Earth Sciences* 65.8, p. 2299-2309. DOI : [10.1007/s12665-012-1562-x](https://doi.org/10.1007/s12665-012-1562-x). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01268354> (cf. p. 43).
- BLÖSCHL, G. et al. (2019). « Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective ». In : *Hydrological Sciences Journal* 64.10, p. 1141-1158. DOI : [10.1080/02626667.2019.1620507](https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507). URL : <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507> (cf. p. 32, 49).
- BODIN, J. et al. (août 2012). « Predictive modelling of hydraulic head responses to dipole flow experiments in a fractured/karstified limestone aquifer : Insights from a comparison of five modelling approaches to real-field experiments ». In : *Journal of Hydrology* 454, p. 82-100. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2012.05.069](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.069) (cf. p. 21).
- BONACCI, O. et al. (2006). « Karst flash floods : an example from the Dinaric karst (Croatia) ». In : *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6.2, p. 195-203. DOI : [10.5194/nhess-6-195-2006](https://doi.org/10.5194/nhess-6-195-2006). URL : <https://nhess.copernicus.org/articles/6/195/2006/> (cf. p. 17).
- BOSÁK, P. (1989). « An Introduction to Karst-Related Mineral Deposits ». In : *Paleokarst*. Sous la dir. de P. BOSÁK et al. T. 1. Developments in Earth Surface Processes. Elsevier, p. 367-375. DOI : <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-98874-4.50027-6> (cf. p. 17).
- BUGMANN, H. et R. SEIDL (2022). « The evolution, complexity and diversity of models of long-term forest dynamics ». In : *Journal of Ecology* 110.10, p. 2288-2307. DOI : <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13989>. eprint : <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1365-2745.13989>. URL : <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1365-2745.13989> (cf. p. 49).
- BURRI, N. M. et al. (2019). « A review of threats to groundwater quality in the anthropocene ». In : *Science of The Total Environment* 684, p. 136-154. ISSN : 0048-9697. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.236>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719322776> (cf. p. 15).

- CALLI, S. S. et al. (2022). « Contribution of the satellite-data driven snow routine to a karst hydrological model ». In : *Journal of Hydrology* 607, p. 127511. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127511>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169422000865>.
- CAO, Z. et al. (2022). « Watershed Ecohydrological Processes in a Changing Environment : Opportunities and Challenges ». In : *Water* 14.9. ISSN : 2073-4441. DOI : [10.3390/w14091502](https://doi.org/10.3390/w14091502). URL : <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/9/1502> (cf. p. 49).
- CARRIÈRE, S. D. et K. CHALIKAKIS (2022). « Hydrogeophysical monitoring of intense rainfall infiltration in the karst critical zone : A unique electrical resistivity tomography data set ». In : *Data in Brief* 40, p. 107762. ISSN : 2352-3409. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107762>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340921010362> (cf. p. 46).
- CARRIÈRE, S. D., K. CHALIKAKIS et al. (2013). « Combining Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study geological structuring of karst Unsaturated Zone ». In : *Journal of Applied Geophysics* 94, p. 31-41. ISSN : 0926-9851. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.014>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985113000700> (cf. p. 46).
- CARRIÈRE, S. D., B. LOISEAU et al. (2021). « First Evidence of Correlation Between Evapotranspiration and Gravity at a Daily Time Scale From Two Vertically Spaced Superconducting Gravimeters ». In : *Geophysical Research Letters* 48.24. e2021GL096579. DOI : <https://doi.org/10.1029/2021GL096579>. eprint : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2021GL096579>. URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2021GL096579> (cf. p. 33).
- CARRIÈRE, S. D. (fév. 2014). « Etude hydrogéophysique de la structure et du fonctionnement de la zone non saturée du karst ». Theses. Université d'Avignon, 218 p. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01127056> (cf. p. 37).
- CELICO, F. et al. (2006). « Hydrogeological behaviour of some fault zones in a carbonate aquifer of Southern Italy : an experimentally based model ». In : *Terra Nova* 18.5, p. 308-313. DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2006.00694.x>. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-3121.2006.00694.x>. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-3121.2006.00694.x> (cf. p. 17).
- CHALIKAKIS, K., V. PLAGNES et al. (sept. 2011). « Contribution of geophysical methods to karst-system exploration : an overview ». In : *Hydrogeology Journal* 19.6, p. 1169-1180. DOI : [10.1007/s10040-011-0746-x](https://doi.org/10.1007/s10040-011-0746-x). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01315384>.
- CHANG, Y. et al. (2021). « Identifying More Realistic Model Structures by Electrical Conductivity Observations of the Karst Spring ». In : *Water Resources Research* 57.4. e2020WR028587. DOI : <https://doi.org/10.1029/2020WR028587>. eprint : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2020WR028587>. URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020WR028587> (cf. p. 30).
- CHEN, Z. et al. (2017). « The World Karst Aquifer Mapping project : concept, mapping procedure and map of Europe ». In : *Hydrogeology Journal* 25, p. 771-785. ISSN : 1435-0157. DOI : [10.1007/s10040-016-1519-3](https://doi.org/10.1007/s10040-016-1519-3) (cf. p. 16).
- CLAUZON, V. et al. (2020). « Fault zones in limestones : impact on karstogenesis and groundwater flow (Lez aquifer, southern France) ». In : *Hydrogeology Journal* 28, p. 2387-2408. DOI : [10.1007/s10040-020-02189-9](https://doi.org/10.1007/s10040-020-02189-9). URL : <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02189-9> (cf. p. 22).
- COCHARD, J., P. LÉONIDE, J. BORGOMANO, Y. GUGLIELMI, G. MASSONNAT, J. ROLANDO et al. (jan. 2021). « Reservoir properties of Barremian - Aptian urgonian limestones, SE France, Part 2 : Influence of diagenesis and fracturing ». In : *Journal of Petroleum Geology* 44, p. 97-114. DOI : [10.1111/jpg.12780](https://doi.org/10.1111/jpg.12780) (cf. p. 16).
- COUNCIL, N. R. (2001). *Basic Research Opportunities in Earth Science*. Washington, DC : The National Academies Press. ISBN : 978-0-309-07133-8. DOI : [10.17226/9981](https://doi.org/10.17226/9981) (cf. p. 33).
- COUSQUER, Y. et H. JOURDE (2022). « Reducing uncertainty of karst aquifer modeling with complementary hydrological observations for the sustainable management of groundwater resources ». In : *Journal of Hydrology* 612, p. 128130. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128130>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169422007053> (cf. p. 28).
- DAL SOGLIO, L. (2019). « Hétérogénéité géologique, spéléogénèse et hydrodynamique du karst : du concept à la modélisation numérique ». Theses. Université d'Avignon. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02893236> (cf. p. 17).
- DÖLL, P. et K. FIEDLER (2008). « Global-scale modeling of groundwater recharge ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 12.3, p. 863-885. DOI : [10.5194/hess-12-863-2008](https://doi.org/10.5194/hess-12-863-2008). URL : <https://hess.copernicus.org/articles/12/863/2008/> (cf. p. 15).
- DOS SANTOS, V. et al. (2018). « Hydrologic Response to Land Use Change in a Large Basin in Eastern Amazon ». In : *Water* 10.4. ISSN : 2073-4441. DOI : [10.3390/w10040429](https://doi.org/10.3390/w10040429). URL : <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/4/429>.
- DUBOIS, E. et al. (2020). « Calibration of a lumped karst system model and application to the Qachqouch karst spring (Lebanon) under climate change conditions ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 24.9, p. 4275-4290. DOI : [10.5194/hess-24-4275-2020](https://doi.org/10.5194/hess-24-4275-2020). URL : <https://hess.copernicus.org/articles/24/4275/2020/> (cf. p. 22).
- DUBUS, I. G. et al. (2003). « Sources of uncertainty in pesticide fate modelling ». In : *Science of The Total Environment* 317.1, p. 53-72. ISSN : 0048-9697. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00362-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00362-0). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969703003620> (cf. p. 24).
- DUKU, C. et L. HEIN (2021). « The impact of deforestation on rainfall in Africa : a data-driven assessment ». In : *Environmental Research Letters* 16.6, p. 064044. DOI : [10.1088/1748-9326/abfcfb](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfcfb). URL : <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfcfb> (cf. p. 49).

- DURAN, L. et al. (2020). « Analyzing multi-scale hydrodynamic processes in karst with a coupled conceptual modeling and signal decomposition approach ». In : *Journal of Hydrology* 583, p. 124625. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124625>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169420300858> (cf. p. 22, 28, 30).
- DUUN-HENRIKSEN, A. et al. (mar. 2013). « Model Identification Using Stochastic Differential Equation Grey-Box Models in Diabetes ». In : *Journal of diabetes science and technology* 7, p. 431-440. DOI : [10.1177/193229681300700220](https://doi.org/10.1177/193229681300700220).
- EAMUS, D. et al. (2016). « Groundwater Dependent Ecosystems : Classification, Identification Techniques and Threats ». In : *Integrated Groundwater Management : Concepts, Approaches and Challenges*. Sous la dir. d' A. J. JAKEMAN et al. Cham : Springer International Publishing, p. 313-346. DOI : [10.1007/978-3-319-23576-9_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_13) (cf. p. 15).
- EARMAN, S. et M. DETTINGER (déc. 2011). « Potential impacts of climate change on groundwater resources – a global review ». In : *Journal of Water and Climate Change* 2.4, p. 213-229. ISSN : 2040-2244. DOI : [10.2166/wcc.2011.034](https://doi.org/10.2166/wcc.2011.034). eprint : <https://iwaponline.com/jwcc/article-pdf/2/4/213/375271/213.pdf>. URL : <https://doi.org/10.2166/wcc.2011.034>.
- EBEL, B. A. et K. LOAGUE (2006). « Physics-based hydrologic-response simulation : Seeing through the fog of equifinality ». In : *Hydrological Processes* 20.13, p. 2887-2900. DOI : <https://doi.org/10.1002/hyp.6388>. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/hyp.6388>. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.6388> (cf. p. 24).
- FERGUSON, G. et al. (2021). « Crustal Groundwater Volumes Greater Than Previously Thought ». In : *Geophysical Research Letters* 48.16, e2021GL093549. DOI : <https://doi.org/10.1029/2021GL093549>. URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2021GL093549> (cf. p. 15).
- FILIPPOV, A. (mar. 2004). « Mineral deposits in karst ». In : p. 514-515. ISBN : 1-57958-399-7 (cf. p. 17).
- FRANK, S. et al. (2021). « Improved understanding of dynamic water and mass budgets of high-alpine karst systems obtained from studying a well-defined catchment area ». In : *Hydrological Processes* 35.4, e14033. DOI : <https://doi.org/10.1002/hyp.14033>. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/hyp.14033>. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.14033> (cf. p. 28).
- GAILLARDET, J., B. DUPRÉ et al. (1999). « Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers ». In : *Chemical Geology* 159.1, p. 3-30. ISSN : 0009-2541. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00031-5) (cf. p. 20).
- GAILLARDET, J., D. CALMELS et al. (2019). « Global climate control on carbonate weathering intensity ». In : *Chemical Geology* 527. Evolution of Carbonate and Karst Critical Zones, p. 118762. ISSN : 0009-2541. DOI : [10.1016/j.chemgeo.2018.05.009](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.009). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009254118302298> (cf. p. 20).
- GARIN, PATRICE et al. (2021). « Réfléchir l'interdisciplinarité à INRAE ». In : *Nat. Sci. Soc.* 29.2, p. 206-212. DOI : [10.1051/nss/2021034](https://doi.org/10.1051/nss/2021034). URL : <https://doi.org/10.1051/nss/2021034> (cf. p. 32).
- GERARD, M.-F. et al. (2018). « H+, un réseau National de sites hydrogéologiques pour la caractérisation, la quantification et la modélisation des transferts d'eau, d'éléments et d'énergie dans les aquifères souterrains hétérogènes ». In : *Géologues* 195 (cf. p. 33).
- GEYER, T. et al. (2007). « Multitracer Test Approach to Characterize Reactive Transport in Karst Aquifers ». In : *Groundwater* 45.1, p. 36-45. DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00261.x>. eprint : <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1745-6584.2006.00261.x>. URL : <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-6584.2006.00261.x> (cf. p. 40).
- GOLDSCHIEDER, N., Z. CHEN et al. (2020). « Global distribution of carbonate rocks and karst water resources ». In : *Hydrogeology Journal* 28.5, p. 1661-1677. ISSN : 1435-0157. DOI : [10.1007/s10040-020-02139-5](https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5) (cf. p. 16).
- GOLDSCHIEDER, N., J. MEIMAN et al. (jan. 2008). « Tracer test in karst hydrogeology and speleology ». In : *International Journal of Speleology* 37, p. 27-40. DOI : [10.5038/1827-806X.37.1.3](https://doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.3) (cf. p. 40).
- GOMBERT, P. (2002). « Role of karstic dissolution in global carbon cycle ». In : *Global and Planetary Change* 33.1. The global carbon cycle and its changes over glacial-interglacial cycles, p. 177-184. ISSN : 0921-8181. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(02\)00069-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(02)00069-3). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818102000693> (cf. p. 20).
- GORELICK, S. M. et C. ZHENG (2015). « Global change and the groundwater management challenge ». In : *Water Resources Research* 51.5, p. 3031-3051. DOI : <https://doi.org/10.1002/2014WR016825>. URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014WR016825> (cf. p. 16).
- GOURC, J. (2007). « Les aménagements forestiers des forêts publiques du mont Ventoux. » In : *Forêt Méditerranéenne* XXVIII.4, p. 349-358. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03565329> (cf. p. 49).
- GRIMES, K. (avr. 1999). « The Water Below : An introduction to karst hydrology and the hydrological setting of the Australian karsts ». In : DOI : [10.13140/2.1.3630.0168](https://doi.org/10.13140/2.1.3630.0168) (cf. p. 19).
- GUINOT, V. et al. (2015). « Conceptual rainfall-runoff model with a two-parameter, infinite characteristic time transfer function ». In : *Hydrological Processes* 29.22, p. 4756-4778. DOI : [10.1002/hyp.10523](https://doi.org/10.1002/hyp.10523). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01143608> (cf. p. 22).
- GUPTA, H. V., H. KLING et al. (2009). « Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling ». In : *Journal of Hydrology* 377.1, p. 80-91. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169409004843> (cf. p. 26).

- GUPTA, H. V., S. SOROOSHIAN et al. (1998). « Toward improved calibration of hydrologic models : Multiple and noncommensurable measures of information ». In : *Water Resources Research* 34.4, p. 751-763. DOI : <https://doi.org/10.1029/97WR03495> (cf. p. 24).
- GUTIERREZ, F. et al. (2014). « A review on natural and human-induced hazards and impacts in karst. » In : *Earth-Science Reviews* 138, p. 61-88. DOI : [10.1016/j.earscirev.2014.08.002](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02046589> (cf. p. 17).
- HALL, J. (avr. 2009). « Handling uncertainty in the hydroinformatic process ». In : *Hydroinformatic* 5. DOI : [10.2166/hydro.2003.0019](https://doi.org/10.2166/hydro.2003.0019) (cf. p. 24).
- HARTMANN, A., N. GOLDSCHIEDER et al. (2014). « Karst water resources in a changing world : Review of hydrological modeling approaches ». In : *Reviews of Geophysics* 52.3, p. 218-242. DOI : <https://doi.org/10.1002/2013RG000443>. URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2013RG000443> (cf. p. 16, 17, 19).
- HARTMANN, A., T. WAGENER et al. (2013). « Testing the realism of model structures to identify karst system processes using water quality and quantity signatures ». In : *Water Resources Research* 49.6, p. 3345-3358. DOI : <https://doi.org/10.1002/wrcr.20229> (cf. p. 24).
- HARTMANN, A., M. WEILER et al. (2013). « Process-based karst modelling to relate hydrodynamic and hydrochemical characteristics to system properties ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 17.8, p. 3305-3321. DOI : [10.5194/hess-17-3305-2013](https://doi.org/10.5194/hess-17-3305-2013). URL : <https://hess.copernicus.org/articles/17/3305/2013/> (cf. p. 30).
- HARTMANN, H. et al. (2022). « Climate Change Risks to Global Forest Health : Emergence of Unexpected Events of Elevated Tree Mortality Worldwide ». In : *Annual Review of Plant Biology* 73.1. PMID : 35231182, p. 673-702. DOI : [10.1146/annurev-arplant-102820-012804](https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-012804). eprint : <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-012804>. URL : <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-012804> (cf. p. 49).
- HICKS, C. C. et al. (2010). « Interdisciplinarity in the environmental sciences : barriers and frontiers ». In : *Environmental Conservation* 37.4, p. 464-477. DOI : [10.1017/S0376892910000822](https://doi.org/10.1017/S0376892910000822) (cf. p. 32).
- HOUGHTON, R. A. et G. M. WOODWELL (1989). « Global Climatic Change ». In : *Scientific American* 260.4, p. 36-47. ISSN : 00368733, 19467087. URL : <http://www.jstor.org/stable/24987210> (visité le 25/08/2022) (cf. p. 20).
- HRACHOWITZ, M. et M. P. CLARK (2017). « HESS Opinions : The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 21.8, p. 3953-3973. DOI : [10.5194/hess-21-3953-2017](https://doi.org/10.5194/hess-21-3953-2017). URL : <https://hess.copernicus.org/articles/21/3953/2017/>.
- JAZAYERI NOUSHABADI, M. et al. (2011). « Influence of the observation scale on permeability estimation at local and regional scales through well tests in a fractured and karstic aquifer (Lez aquifer, Southern France) ». In : *Journal of Hydrology* 403.3, p. 321-336. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.013>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411002538> (cf. p. 32).
- JEANNIN, P.-Y., G. ARTIGUE, C. BUTSCHER, Y. CHANG, J.-B. CHARLIER, L. DURAN, L. GILL, A. HARTMANN, A. JOHANNET, H. JOURDE, A. KAVOUSI, T. LIESCH, Y. LIU, M. LÜTHI et al. (2021). « Karst modelling challenge 1 : Results of hydrological modelling ». In : *Journal of Hydrology* 600, p. 126508. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126508> (cf. p. 21).
- JOEL, G. et W. CRAMER (oct. 2016). « Climate change : The 2015 Paris Agreement thresholds and Mediterranean basin ecosystems ». In : *Science* 354, p. 465-468. DOI : [10.1126/science.aah5015](https://doi.org/10.1126/science.aah5015) (cf. p. 49).
- JOHNK, B. T. et D. C. MAYS (2021). « Wildfire Impacts on Groundwater Aquifers : A Case Study of the 1996 Honey Boy Fire in Beaver County, Utah, USA ». In : *Water* 13.16. ISSN : 2073-4441. DOI : [10.3390/w13162279](https://doi.org/10.3390/w13162279). URL : <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/16/2279> (cf. p. 49).
- JOUVES, J. et al. (2017). « Speleogenesis, geometry, and topology of caves : A quantitative study of 3D karst conduits ». In : *Geomorphology* 298, p. 86-106. ISSN : 0169-555X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.019>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X17303975> (cf. p. 17, 18).
- KAVETSKI, D. et al. (2006). « Calibration of conceptual hydrological models revisited : 1. Overcoming numerical artefacts ». In : *Journal of Hydrology* 320.1. The model parameter estimation experiment, p. 173-186. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.012>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169405003379> (cf. p. 24).
- KEESMAN, K. (1995). « Modelling change in environmental systems, A. J. Jakeman, M. B. Beck and M. J. MCaleer (eds), Wiley, Chichester, 1993. No of pages 584. Price : £59.95. ISBN 0-471-94263-4 ». In : *Environmetrics* 6.4, p. 425-427. DOI : <https://doi.org/10.1002/env.3170060413> (cf. p. 21).
- KIRALY, L. (1998). « Modelling Karst Aquifers by the Combined Discrete Channel and Continuum Approach ». In : *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie* 16, p. 77-98 (cf. p. 17).
- KIRCHNER, J. W. (2006). « Getting the right answers for the right reasons : Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology ». In : *Water Resources Research* 42.3. DOI : <https://doi.org/10.1029/2005WR004362> (cf. p. 28, 43).
- KLIMCHOUK, A. B. (2016). « The Karst Paradigm : Changes, Trends and Perspectives ». In : *Acta Carsologica* 44.3. DOI : [10.3986/ac.v44i3.2996](https://doi.org/10.3986/ac.v44i3.2996). URL : <https://ojs.zrc-sazu.si/carsologica/article/view/2996>.
- KONG-A-SIOU, L. et al. (2013). « KnoX method, or Knowledge eXtraction from neural network model. Case study on the Lez karst aquifer (southern France) ». In : *Journal of Hydrology* 507, p. 19-32. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.011>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413007300> (cf. p. 30).

- KUCZERA, G. et M. MROCKOWSKI (1998). « Assessment of hydrologic parameter uncertainty and the worth of multiresponse data ». In : *Water Resources Research* 34.6, p. 1481-1489. DOI : <https://doi.org/10.1029/98WR00496> (cf. p. 24).
- KUMAR, S. et al. (2021). « Groundwater monitoring and characterization by a vertical dipole of superconducting gravimeters in a karst aquifer, France ». In : *First International Meeting for Applied Geoscience & Energy Expanded Abstracts*, p. 889-893. DOI : [10.1190/segam2021-3582839.1](https://doi.org/10.1190/segam2021-3582839.1). eprint : <https://library.seg.org/doi/pdf/10.1190/segam2021-3582839.1>. URL : <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/segam2021-3582839.1> (cf. p. 33).
- KURZ, W. et al. (avr. 2008). « Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change ». In : *Nature* 452, p. 987-990 (cf. p. 49).
- LAUBER, U. et al. (2014). « Spatially resolved information on karst conduit flow from in-cave dye tracing ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 18.2, p. 435-445. DOI : [10.5194/hess-18-435-2014](https://doi.org/10.5194/hess-18-435-2014). URL : <https://hess.copernicus.org/articles/18/435/2014/> (cf. p. 40).
- LE MESNIL, M. (2021). « Signatures Hydrologiques des Bassins Karstiques ». Theses. Montpellier SupAgro. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03578569> (cf. p. 24).
- LE MOINE, N. et al. (2007). « How can rainfall-runoff models handle intercatchment groundwater flows? Theoretical study based on 1040 French catchments ». In : *Water Resources Research* 43, p. 1-11. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-02589510> (cf. p. 22).
- LEFÈVRE, F. et al. (2020). « Étude prospective de l'impact des changements climatiques et socio-économiques sur les forêts du mont Ventoux ». In : *Rendez-vous Techniques de l'ONF* 63-64, p. 54-56. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-03728250> (cf. p. 49).
- LEGCHENKO, A. (2005). « Improved modelling of the magnetic resonance signal in the presence of shallow aquifers ». In : *Near Surface Geophysics* 3.3, p. 121-130. DOI : [10.3997/1873-0604.2005008](https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005008). URL : <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00383184> (cf. p. 37).
- LEGCHENKO, A., J.-M. BALTASSAT et al. (2002). « Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists ». In : *Journal of Applied Geophysics* 50.1. Surface Nuclear Magnetic Resonance : What is Possible?, p. 21-46. ISSN : 0926-9851. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00128-3](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00128-3). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985102001283> (cf. p. 36).
- LEGCHENKO, A. et P. VALLA (2002). « A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements ». In : *Journal of Applied Geophysics* 50.1. Surface Nuclear Magnetic Resonance : What is Possible?, p. 3-19. ISSN : 0926-9851. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00127-1). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985102001271> (cf. p. 37).
- LÉONIDE, P. et al. (2014). « Diagenetic patterns and pore space distribution along a platform to outer-shelf transect (Urgonian limestone, Barremian–Aptian, SE France) ». In : *Sedimentary Geology* 306, p. 1-23. ISSN : 0037-0738. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2014.03.001> (cf. p. 16).
- LERAT, J. et al. (2012). « Towards robust methods to couple lumped rainfall–runoff models and hydraulic models : A sensitivity analysis on the Illinois River ». In : *Journal of Hydrology* 418-419, p. 123-135. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2009.09.019](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.019). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00732342> (cf. p. 30).
- LESPARRE, N. et al. (mar. 2017). « New insights on fractures deformation from tiltmeter data measured inside the Fontaine de Vaucluse karst system ». In : *Geophysical Journal International* 208.3, pp.1389-1402. DOI : [10.1093/gji/ggw446](https://doi.org/10.1093/gji/ggw446). URL : <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-01408482> (cf. p. 33).
- LIU, Z. et al. (2010). « A new direction in effective accounting for the atmospheric CO₂ budget : Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms ». In : *Earth-Science Reviews* 99.3, p. 162-172. ISSN : 0012-8252. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.03.001>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825210000164> (cf. p. 20).
- LONCAR, G. et al. (mar. 2018). « Hydraulic-Hydrology Analysis of the Turbulent Seepage Flow within Karst Aquifer of the Golubinka Spring Catchment ». In : *Geofluids* 2018, p. 6424702. ISSN : 1468-8115. DOI : [10.1155/2018/6424702](https://doi.org/10.1155/2018/6424702). URL : <https://doi.org/10.1155/2018/6424702> (cf. p. 28).
- LOWE, D. et J. GUNN (1992). *The Origin of Limestone Caverns : an Inception Horizon Hypothesis*. Manchester Polytechnic. URL : <https://books.google.fr/books?id=JdFWGwAACAAJ> (cf. p. 17).
- LUKAČ REBERSKI, J. et al. (2022). « Emerging organic contaminants in karst groundwater : A global level assessment ». In : *Journal of Hydrology* 604, p. 127242. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127242>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169421012920> (cf. p. 17).
- LUO, P. et al. (2018). « Impact of forest maintenance on water shortages : Hydrologic modeling and effects of climate change ». In : *Science of The Total Environment* 615, p. 1355-1363. ISSN : 0048-9697. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.044>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717323859> (cf. p. 49).
- MARSILY, G. de (1981). *Hydrogéologie quantitative*. Collection Sciences de la terre. Masson. ISBN : 9782225755040. URL : <https://books.google.fr/books?id=h4bQAAAAIAAJ> (cf. p. 16).
- MARTIN-GOUSSET, L. et al. (2019). « Habitats et dynamiques de végétation en ubac du Mont-Ventoux – Étude de la Réserve biologique intégrale ». In : *Naturae* 5, p. 113-164 (cf. p. 49).
- MASSE, J.-P. et M. FENERCI-MASSE (2011). « Drowning discontinuities and stratigraphic correlation in platform carbonates. The late Barremian–early Aptian record of southeast France ». In : *Cretaceous Research* 32.6, p. 659-684. ISSN : 0195-6671. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2011.04.003>.

- MASSEI, N., H. Q. WANG et al. (jan. 2006). « Interpreting tracer breakthrough tailing in a conduit-dominated karstic aquifer ». In : *Hydrogeology Journal* 14.6, p. 849-858. DOI : [10.1007/s10040-005-0010-3](https://doi.org/10.1007/s10040-005-0010-3). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00327132> (cf. p. 40).
- MCELDRONE, A. J. et al. (2004). « Variation in xylem structure and function in stems and roots of trees to 20 m depth ». In : *New Phytologist* 163.3, p. 507-517. DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01127.x>. eprint : <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2004.01127.x>. URL : <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1469-8137.2004.01127.x> (cf. p. 37).
- MCMILLAN, H. (2020). « Linking hydrologic signatures to hydrologic processes : A review ». In : *Hydrological Processes* 34.6, p. 1393-1409. DOI : <https://doi.org/10.1002/hyp.13632> (cf. p. 24).
- MEDICI, G. et L. J. WEST (2021). « Groundwater flow velocities in karst aquifers; importance of spatial observation scale and hydraulic testing for contaminant transport prediction ». In : *Environmental Science and Pollution Research* 28.32, p. 43050-43063. ISSN : 1614-7499. DOI : <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14840-3> (cf. p. 32).
- MERO, F. (1963). « Application of the groundwater depletion curves in analyzing and forecasting spring discharges influenced by well fields ». In : *Symposium on surface waters, General assembly of Berkeley of IUGG, IAHS Publication*. T. 63, p. 107-117 (cf. p. 23).
- MICHAEL B. ABBOTT, J. C. R., éd. (1996). Kluwer Academic Publishers 1996 : Springer Dordrecht, p. 336. DOI : [10.1007/978-94-009-0257-2](https://doi.org/10.1007/978-94-009-0257-2) (cf. p. 22).
- éd. (1998). Balkema, Rotterdam : CRC Press, p. 582 (cf. p. 40).
- MILANOVIĆ, P. (2018). *Engineering Karstology of Dams and Reservoirs (1st ed.)* CRC Press. DOI : <https://doi.org/10.1201/9780429453403> (cf. p. 17).
- MOECK, C. et al. (2020). « A global-scale dataset of direct natural groundwater recharge rates : A review of variables, processes and relationships ». In : *Science of The Total Environment* 717, p. 137042. ISSN : 0048-9697. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137042>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720305520> (cf. p. 49).
- MOHAMMADI, B. et al. (2022). « IHACRES, GR4J and MISD-based multi conceptual-machine learning approach for rainfall-runoff modeling ». In : *Scientific Reports* 12.1, p. 2045-2322. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16215-1> (cf. p. 30).
- MONIER, F. (2019). « Un territoire de la dissuasion nucléaire : le plateau d'Albion ». In : *E3S Web Conf.* 88, p. 0001. DOI : [10.1051/e3sconf/20198804001](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198804001). URL : <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198804001> (cf. p. 32).
- MORALES, T. et al. (2017). « Solute transport characterization in karst aquifers by tracer injection tests for a sustainable water resource management ». In : *Journal of Hydrology* 547, p. 269-279. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.009>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169417300872> (cf. p. 40).
- MOUSSA, R. (2010). « When monstrosity can be beautiful while normality can be ugly : assessing the performance of event-based flood models ». In : *Hydrological Sciences Journal* 55.6. Contact : moussa@supagro.inra.fr, p. 1074-1084. DOI : [10.1080/02626667.2010.505893](https://doi.org/10.1080/02626667.2010.505893). URL : <https://hal.inrae.fr/hal-02662103> (cf. p. 26).
- NASH, J. et J. SUTCLIFFE (1970). « River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles ». In : *Journal of Hydrology* 10.3, p. 282-290. ISSN : 0022-1694. DOI : [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556> (cf. p. 26).
- NINGRE, J. (2007). « Le reboisement du Ventoux au XIXe siècle : techniques et travaux. » In : *Forêt Méditerranéenne* XXVIII.4, p. 319-326. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03565203> (cf. p. 49, 50).
- OHNO, T. (mar. 2002). « Fluorescence Inner-Filtering Correction for Determining the Humification Index of Dissolved Organic Matter ». In : *Environmental science & technology* 36, p. 742-6. DOI : [10.1021/es0155276](https://doi.org/10.1021/es0155276) (cf. p. 43).
- OKKAN, U. et al. (2021). « Embedding machine learning techniques into a conceptual model to improve monthly runoff simulation : A nested hybrid rainfall-runoff modeling ». In : *Journal of Hydrology* 598, p. 126433. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126433>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169421004807> (cf. p. 30).
- OLIVARI, G. et J. GIUDICELLI (2010). « Les cours d'eau méditerranéens à régime de soutien karstique. Spécificités écologiques et hydrobiologiques ». In : *Ecologia Mediterranea* 36.1, p. 25-44. DOI : [10.3406/ecmed.2010.1374](https://doi.org/10.3406/ecmed.2010.1374). URL : https://www.persee.fr/doc/ecmed_0153-8756_2010_num_36_1_1374 (cf. p. 20).
- OWUOR, S. O. et al. (2016). « Groundwater recharge rates and surface runoff response to land use and land cover changes in semi-arid environments ». In : *Ecological Processes* 5.1, p. 1-21 (cf. p. 49).
- PADILLA, I. et D. VESPER (jan. 2018). « Fate, Transport, and Exposure of Emerging and Legacy Contaminants in Karst Systems : State of Knowledge and Uncertainty ». In : p. 33-49. ISBN : 978-3-319-51069-9. DOI : [10.1007/978-3-319-51070-5_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51070-5_5) (cf. p. 17).
- PALMER, A. N. (jan. 1991). « Origin and morphology of limestone caves ». In : *GSA Bulletin* 103.1, p. 1-21. ISSN : 0016-7606. DOI : [10.1130/0016-7606\(1991\)103<0001:OAM0LC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0001:OAM0LC>2.3.CO;2). eprint : <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-pdf/103/1/1/3380827/i0016-7606-103-1-1.pdf> (cf. p. 18).
- PARISE, M. et al. (2018). « Recent advances in karst research : from theory to fieldwork and applications ». In : *Geological Society, London, Special Publications* 466.1, p. 1-24. DOI : [10.1144/SP466.26](https://doi.org/10.1144/SP466.26). URL : <https://www.lyellcollection.org/doi/abs/10.1144/SP466.26> (cf. p. 16).
- PATTANAYAK, S. K. et D. T. BUTRY (2005). « Spatial Complementarity of Forests and Farms : Accounting for Ecosystem Services ». In : *American Journal of Agricultural Economics* 87.4, p. 995-1008. DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1467-8276.2005.00783.x>. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1467->

- 8276.2005.00783.x. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-8276.2005.00783.x> (cf. p. 49).
- PECK, A. et D. WILLIAMSON (1987). « Effects of forest clearing on groundwater ». In : *Journal of Hydrology* 94.1. Hydrology and Salinity in the Collie River Basin, Western Australia, p. 47-65. ISSN : 0022-1694. DOI : [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90032-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90032-1). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169487900321> (cf. p. 49).
- PEI, H. et al. (2022). « Quantifying impacts of climate dynamics and land-use changes on water yield service in the agro-pastoral ecotone of northern China ». In : *Science of The Total Environment* 809, p. 151153. ISSN : 0048-9697. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151153>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721062318> (cf. p. 49).
- PENUELAS, J. et J. SARDANS (2021). « Global Change and Forest Disturbances in the Mediterranean Basin : Breakthroughs, Knowledge Gaps, and Recommendations ». In : *Forests* 12.5. ISSN : 1999-4907. URL : <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/5/603> (cf. p. 49).
- PERRIN, J. et M. LUETSCHER (2008). « Inference of the structure of karst conduits using quantitative tracer tests and geological information : example of the Swiss Jura ». In : *Hydrogeology Journal* 16.5, p. 951-967. DOI : [10.1007/s10040-008-0281-6](https://doi.org/10.1007/s10040-008-0281-6). URL : <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00643655> (cf. p. 40).
- PICCINI, L. et M. MECCHIA (2009). « Solution weathering rate and origin of karst landforms and caves in the quartzite of Auyan-tepui (Gran Sabana, Venezuela) ». In : *Geomorphology* 106.1. Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology, p. 15-25. ISSN : 0169-555X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.019>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X08004169> (cf. p. 16).
- PINARD, H. et al. (2016). « Full-waveform inversion of GPR data acquired between boreholes in Rustrel carbonates ». In : *E3S Web of Conferences*. Special Issue : i-DUST 2016 – Inter-Disciplinary Underground Science & Technology, Avignon, June 1-3, 2016 12. ACT, 01002 :1-7. DOI : [10.1051/e3sconf/20161201002](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161201002). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02009517> (cf. p. 36).
- PRIÉ, V. (2008). « Les escargots souterrains, nouveaux marqueurs des hydrosystèmes karstiques ». In : *Karstologia* 52, p. 7-16 (cf. p. 20).
- PRONK, M. et al. (2009). « Percolation and Particle Transport in the Unsaturated Zone of a Karst Aquifer ». In : *Groundwater* 47.3, p. 361-369. DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00509.x>. eprint : <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1745-6584.2008.00509.x>. URL : <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-6584.2008.00509.x> (cf. p. 40).
- QI, J. et al. (2018). « Characterization of Karst Conduit Network Using Long-Distance Tracer Test in Lijiang, South-western China ». In : *Water* 10.7. ISSN : 2073-4441. DOI : [10.3390/w10070949](https://doi.org/10.3390/w10070949). URL : <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/7/949> (cf. p. 40).
- RINAUDO, J.-D. et al. (2020). « Groundwater Management Planning at the River Basin District Level : Comparative Analysis of the Adour-Garonne and Loire-Bretagne River Basins ». In : *Sustainable Groundwater Management : A Comparative Analysis of French and Australian Policies and Implications to Other Countries*. Sous la dir. de J.-D. RINAUDO et al. Cham : Springer International Publishing, p. 67-91. ISBN : 978-3-030-32766-8. DOI : [10.1007/978-3-030-32766-8_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8_4). URL : https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8_4 (cf. p. 15).
- ROUX, F. et al. (jan. 2011). « Les ORE, nouveaux observatoires de recherche sur l'environnement ». In : *La Météorologie [ISSN 0026-1181], 2003, Série 8, N 40 ; p. 101-107* 8. DOI : [10.4267/2042/36273](https://doi.org/10.4267/2042/36273) (cf. p. 32).
- RUFFAULT, J. et al. (2020). « Increased likelihood of heat-induced large wildfires in the Mediterranean Basin ». In : *Scientific Reports* 10.1, p. 13790. URL : <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70069-z>.
- SAFT, M. et al. (fév. 2016). « Bias in streamflow projections due to climate-induced shifts in catchment response ». In : *Geophysical Research Letters* 43, n/a-n/a. DOI : [10.1002/2015GL067326](https://doi.org/10.1002/2015GL067326) (cf. p. 49).
- SALCEDO, M. et al. (2020). « Matrix-free crosshole elliptical-anisotropy tomography : parametrization analysis and ground-penetrating radar applications in carbonates ». In : *Near Surface Geophysics* 18.6, p. 697-712. DOI : <https://doi.org/10.1002/nsg.12116>. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/nsg.12116>. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nsg.12116> (cf. p. 46, 48).
- SCANLON, B. R. et al. (2006). « Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions ». In : *Hydrological Processes* 20.15, p. 3335-3370. DOI : <https://doi.org/10.1002/hyp.6335>. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/hyp.6335>. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.6335> (cf. p. 49).
- SCHULER, P. et al. (2021). « Using Wavelet Coherence to Characterize Surface Water Infiltration into a Low-Lying Karst Aquifer ». In : *Groundwater* 59.1, p. 71-79. DOI : <https://doi.org/10.1111/gwat.13012>. URL : <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gwat.13012> (cf. p. 28).
- SEZEN, C. et al. (2019). « Hydrological modelling of karst catchment using lumped conceptual and data mining models ». In : *Journal of Hydrology* 576, p. 98-110. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.036>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169419305839> (cf. p. 22).
- SIVELLE, V. et H. JOURDE (2021). « A methodology for the assessment of groundwater resource variability in karst catchments with sparse temporal measurements ». In : *Hydrogeology Journal* 29.1, p. 137-157. ISSN : 1435-0157. DOI : [10.1007/s10040-020-02239-2](https://doi.org/10.1007/s10040-020-02239-2). URL : <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02239-2> (cf. p. 28).
- SIVELLE, V., L. PÉROTIN et al. (p. d.). « A lumped parameter model to evaluate the relevance of excess air (EA) as a tracer of exchanged flows between transmissive and capacitive compartments of karst systems ». In : *Frontiers in Water* (), p. 126 (cf. p. 24).

- SMART, C. C. (1988). « Artificial Tracer Techniques for the Determination of the Structure of Conduit Aquifers ». In : *Groundwater* 26.4, p. 445-453. DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1988.tb00411.x>. eprint : <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1745-6584.1988.tb00411.x>. URL : <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-6584.1988.tb00411.x> (cf. p. 40).
- SOPHOCLEOUS, M. (2004). « Groundwater ». In : sous la dir. de L. SILVEIRA et E. J. USUNOFF. UNESCO - EOLSS. Chap. Groundwater recharge (cf. p. 49).
- SPRACKLEN, D. V. et L. GARCIA-CARRERAS (2015). « The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall ». In : *Geophysical Research Letters* 42.21, p. 9546-9552. DOI : <https://doi.org/10.1002/2015GL066063>. eprint : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2015GL066063>. URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015GL066063> (cf. p. 49).
- STEVANOVIC, Z. (2017). « Karst waters in potable water supply : a global scale overview ». In : *Environmental Earth Sciences* 78, p. 662. ISSN : 1866-6299. DOI : [10.1007/s12665-019-8670-9](https://doi.org/10.1007/s12665-019-8670-9) (cf. p. 16).
- TEMBATA, K. et al. (2020). « Don't rely too much on trees : Evidence from flood mitigation in China ». In : *Science of The Total Environment* 732, p. 138410. ISSN : 0048-9697. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138410>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720319239> (cf. p. 49).
- TENDIL, A. (2018). « Contrôles tectoniques, climatiques et paléogéographiques sur l'architecture stratigraphique de la plateforme carbonatée urgonienne provençale (France) : approches sédimentologiques, géochimiques et numériques intégrées ». Theses. Aix-Marseille Université (cf. p. 18, 47, 48).
- TODOROVIĆ, A. et al. (2022). « Assessment of Suitability of Hydrological Models for Climate Change Impact Studies ». In : *EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23-27 May 2022*, EGU22-11463. URL : <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11463> (cf. p. 24).
- TRAMBLAY, Y. et al. (nov. 2020). « Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios ». In : *Earth-Science Reviews* 210, p. 103348. DOI : [10.1016/j.earscirev.2020.103348](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103348). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03024459>.
- TRITZ, S. et al. (fév. 2011). « Modelling the behaviour of a karst system catchment using non-linear hysteretic conceptual model ». In : *Journal of Hydrology* 397.3-4, p. 250-262. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2010.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.001). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03178149> (cf. p. 22).
- TRONTELJ, P. (2009). « David C. Culver and Tanja Pipan 2009 : The Biology of Caves and Other Subterranean Habitats ». In : *Acta Carsologica* 38.2-3. DOI : [10.3986/ac.v38i2-3.168](https://doi.org/10.3986/ac.v38i2-3.168). URL : <https://ojs.zrc-sazu.si/carsologica/article/view/168> (cf. p. 20).
- UNITED NATIONS ORGANIZATION (2022). *The United Nations World Water Development Report 2022 : Groundwater : Making the invisible visible*. Rapp. tech. UNESCO, Paris (cf. p. 15).
- VEIT, E. et C. P. CONRAD (p. d.). « The impact of groundwater depletion on spatial variations in sea level change during the past century ». In : *Geophysical Research Letters* 43.7 (), p. 3351-3359. DOI : <https://doi.org/10.1002/2016GL068118>. URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016GL068118> (cf. p. 15).
- VOSE, J. M. et al. (2011). « Forest ecohydrological research in the 21st century : what are the critical needs? » In : *Ecohydrology* 4.2, p. 146-158. DOI : <https://doi.org/10.1002/eco.193>. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/eco.193>. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eco.193> (cf. p. 49, 50).
- WANG, F. et al. (2018). « Impact of a shallow groundwater table on the global water cycle in the IPSL land-atmosphere coupled model ». In : *Climate Dynamics*. DOI : [10.1007/s00382-017-3820-9](https://doi.org/10.1007/s00382-017-3820-9). URL : <https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-01677362> (cf. p. 15).
- WHITE, W. (jan. 2006). « Fifty years of karst hydrology and hydrogeology : 1953-2003 ». In : *Special Paper of the Geological Society of America* 404, p. 139-152. DOI : [10.1130/2006.2404\(12\)](https://doi.org/10.1130/2006.2404(12)).
- WHITE, W. B. (2007). « A brief history of karst hydrogeology : contributions of the NSS ». In :
- WIBBERLEY, C. A. J. et al. (2008). « Recent advances in the understanding of fault zone internal structure : a review ». In : *Geological Society, London, Special Publications* 299.1, p. 5-33. DOI : [10.1144/SP299.2](https://doi.org/10.1144/SP299.2). URL : <https://www.lyellcollection.org/doi/abs/10.1144/SP299.2> (cf. p. 17).
- WILCOX, B. P. (2010). « Transformative ecosystem change and ecohydrology : ushering in a new era for watershed management ». In : *Ecohydrology* 3.1, p. 126-130. DOI : <https://doi.org/10.1002/eco.104>. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eco.104> (cf. p. 49).
- WILLIAMS, P. W. (2011). « Karst in UNESCO World Heritage Sites ». In : *Karst Management*. Sous la dir. de P. E. van BEYNEN. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 459-480. ISBN : 978-94-007-1207-2. DOI : [10.1007/978-94-007-1207-2_21](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1207-2_21). URL : https://doi.org/10.1007/978-94-007-1207-2_21 (cf. p. 20).
- WRAY, R. (août 1997). « Quartzite dissolution : Karst or pseudokarst? » In : *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers* 46 (cf. p. 16).
- YAPO, P. O. et al. (1998). « Multi-objective global optimization for hydrologic models ». In : *Journal of Hydrology* 204.1, p. 83-97. ISSN : 0022-1694. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00107-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00107-8). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169497001078> (cf. p. 26).
- ZENG, S. et al. (2015). « Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes ». In : *Nature Communications* 10.1, p. 5749. DOI : [10.1038/s41467-019-13772-4](https://doi.org/10.1038/s41467-019-13772-4). URL : <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13772-4>.

- ZHOU, B.-Q. et al. (2021). « Assessing the impact of tunnelling on karst groundwater balance by using lumped parameter models ». In : *Journal of Hydrology* 599, p. 126375. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126375>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169421004224> (cf. p. 22).
- ZSOLNAY, A. et al. (1999). « Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying ». In : *Chemosphere* 38.1, p. 45-50. ISSN : 0045-6535. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(98\)00166-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00166-0). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653598001660> (cf. p. 43).