

Proposition de sujet de thèse 2026

(A remplir par les équipes d'accueil et à retourner à Isabelle HAMMAD :

hammad@cerege.fr

*à renseigner obligatoirement pour la validation du sujet, (1) : A remplir lors de la campagne d'attribution des allocations, à l'issue de la session de juin des Masters

Sujet de doctorat proposé *:

Encadrant(s), nom, prénom, adresse mail *:

M. ARFIB Bruno, arfib@cerege.fr

M^{me} VALLET-COULOMB Christine, vallet@cerege.fr

Laboratoire *: CEREGE

Tableau récapitulatif du sujet

Candidat(e) ⁽¹⁾	
Nom - Prénom :	
Date de naissance :	
Licence (origine, années, mention) :	
Mention et classement au Master 1 année (X ^{ème} sur Y)	
Mention et classement au S3 du Master 2 (X ^{ème} sur Y)	
Mention et classement au S4 du Master 2 (X ^{ème} sur Y)	
Mention et classement au M2 (année) (X ^{ème} sur Y)	
MASTER (nom, université)	
Sujet de doctorat proposé*	La recharge des aquifères karstiques en contexte méditerranéen : apport des isotopes stables de l'eau (Cas du bassin Huveaune – Port-Miou)
Encadrants (2 max, indiquer si HDR ou pas)*	M ^{me} VALLET-COULOMB Christine (HDR), M. ARFIB Bruno
Laboratoire*	CEREGE
Programme finançant la recherche (indiqué si obtenu ou envisagé) (1)	Agence de l'eau, EPAGE HuCA (acquis si thèse ED) SNO Karst, SNO Renoir (acquis)

Sujet de doctorat proposé*

Intitulé* :

La recharge des aquifères karstiques en contexte méditerranéen : apport des isotopes stables de l'eau (Cas du bassin Huveaune – Port-Miou)

Descriptif *:

1. Contexte scientifique

L'eau souterraine des aquifères karstiques représentent une **ressource stratégique** en région méditerranéenne (Xanke et al., 2024). Son importance est amenée à croître dans un contexte de changement climatique marqué par une diminution attendue des débits de surface et une intensification des extrêmes hydrologiques (Sauquet et al., 2025). Le **fonctionnement de ces aquifères carbonatés** est cependant difficile à appréhender en raison de leur structure à perméabilité multiple, combinant matrice fissurée et conduits karstiques.

Cette complexité se traduit par une forte non-linéarité des processus hydrologiques et une réponse hétérogène aux précipitations (Priestley et al. 2025). En particulier, la **recharge des aquifères**, c'est-à-dire la quantité d'eau qui alimente la zone non saturée puis la nappe d'eau souterraine, reste difficile à quantifier alors même qu'elle constitue une donnée clé de la gestion de l'eau. Dans les **systèmes karstiques en contexte méditerranéen**, cette difficulté est accentuée par diverses **contraintes structurelles et climatiques** : (1) des effets de seuil des processus d'infiltration (activation de conduits, saturation de l'épikarst), la coexistence de modalités de recharge multiples (diffuse et concentrée), la forte hétérogénéité spatiale des écoulements souterrains, la gamme extrême d'intensité des précipitations.

2. Apport des isotopes de l'eau pour contraindre les processus hydrologiques

Les isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) constituent des **traceurs naturels** permettant de suivre le devenir des **précipitations dans les hydrosystèmes**. Ils permettent de mettre en évidence la saisonnalité de la recharge à l'échelle globale (Jasechko et al., 2014) et d'investiguer les processus hydrologiques en fonction des contextes climatiques et géologiques (Nlend et al., 2025). Dans les systèmes karstiques, ces approches présentent un potentiel particulièrement important, notamment pour investiguer **les processus de stockage et d'écoulement dans la zone non saturée et les périodes de recharge préférentielle** (Baker et al., 2019 ; Treble et al., 2022). Une application sur l'eau des sources du territoire du bassin versant de l'Huveaune (aquifères fracturés et karstiques) à proximité de Marseille avait permis de montrer que les pluies hivernales les plus importantes sont celles qui rechargent le plus (T. Garin 2022).

Par ailleurs, des travaux récents ont proposé d'**intégrer des traceurs de l'eau dans les modèles hydrologiques**, de type *tracer-aided models* (Richieri et al. 2025) ou plus spécifiquement les isotopes stables dans les *isotope-enabled models* (Birkel et al., 2025). Ces approches permettent de contraindre les flux hydrologiques en réduisant les problèmes d'équifinalité et en améliorant la robustesse des simulations. Toutefois, ces modélisations restent rares, bien qu'elles mériteraient d'être systématisées (Birkel et al., 2025). En contexte karstique les applications sont **complexifiées par la structure du karst et le manque de données isotopiques à haute résolution temporelle et spatiale**. Ces limitations constituent aujourd'hui un verrou méthodologique important, mais également une opportunité scientifique.

3. Objectifs et stratégie méthodologique

L'objectif de cette thèse est de **mieux comprendre et quantifier les processus de recharge des aquifères karstiques en contexte méditerranéen, en mobilisant les isotopes stables de l'eau et leur intégration dans des modèles hydrologiques**. Plus spécifiquement, la thèse se décline en plusieurs axes : (1) **caractériser la variabilité spatio-temporelle de la recharge**, en identifiant les facteurs de contrôle, (2) **comprendre l'évolution du signal isotopique de l'eau** depuis les précipitations jusqu'aux exutoires, en incluant les processus dans la zone non saturée, (3) **intégrer les traceurs isotopiques dans les modèles hydrologiques** (test ou adaptation de modèles existants tels que LuKar, STARR ou KarstMod - Mazzilli et al., 2019 ; Sivelle et al., 2025 ; Richieri et al., 2025), afin d'améliorer la représentation des flux et des stockages, (4) **évaluer l'impact du changement climatique sur la recharge**, en s'appuyant sur des scénarios de type TRACC (Soubeyroux et al., 2024).

La stratégie méthodologique repose sur une démarche intégrée combinant **observation in situ, analyse isotopique, conceptualisation et modélisation**. Le travail s'appuiera sur un cas d'étude principal situé en Basse-Provence carbonatée entre Marseille et Toulon (bassin Huveaune – Port-Miou), représentatif des hydrosystèmes karstiques méditerranéens du sud-est de la France. Une attention particulière sera portée à l'échantillonnage des différents compartiments du cycle de l'eau : les précipitations (réseau de pluviomètres collecteurs), les eaux de la zone non saturée accessible en grotte, les eaux souterraines (sources, forages), les eaux de surface (rivières).

L'**accès à des cavités profondes** de plusieurs centaines de mètres dans les massifs karstiques (Sainte-Baume, Siou-Blanc - Arfib, 2010 ; Jouves, 2018) constitue une opportunité rare pour observer directement les processus d'infiltration et de transfert dans la zone non saturée. Ces observations permettront de caractériser l'éventuelle transformation du signal isotopique au cours du transfert vertical, depuis la surface jusqu'aux réservoirs profonds. Les **analyses** isotopiques seront réalisées au **CEREGE**, et les données acquises seront mises en perspective avec celles issues des **réseaux nationaux d'observation** (SNO Karst et SNO RENOIR), permettant une comparaison avec d'autres systèmes karstiques régionaux (Fontaine de Vaucluse, Dévoluy). Une **approche comparative** sera développée afin de distinguer les contrôles spécifiques à chaque site des processus génériques applicables à l'ensemble des karsts méditerranéens. À terme, ce travail vise à proposer un cadre méthodologique innovant pour la quantification de la recharge en contexte karstique, avec des implications directes pour la gestion des ressources en eau et l'adaptation au changement climatique en région méditerranéenne.

Highlights :

- Mieux comprendre les processus de recharge des aquifères carbonatés karstiques et proposer des méthodes de quantification, par l'aide des isotopes stables de l'eau.
- Compléter les bases de données isotopiques régionales sur la pluie, l'eau de surface et l'eau souterraine et l'enrichir avec des données sur l'eau de la zone non saturée basée sur des échantillonnages en milieu souterrain.
- Améliorer la connaissance hydrogéologique du territoire autour de la Sainte-Baume (Marseille – Toulon) : hydrosystèmes karstiques et relations avec les eaux de surface (focus sur les bassins versants de Port-Miou et de l'Huveaune).
- Expliquer la signature isotopique de l'eau et mettre en évidence des processus locaux qui peuvent influencer l'interprétation.
- Tester l'intégration de traceurs isotopiques dans les modèles pluie-débit (tracer-aided models) pour améliorer la robustesse des simulations.
- Comparer des systèmes karstiques du sud-est de la France, sous influence de climat méditerranéen (mais avec des histoires spéléogénétiques différentes) : Port-Miou - Huveaune, Fontaine de Vaucluse, Dévoluy.
- Utiliser la Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC) pour discuter des changements attendus sur la recharge des eaux souterraines.

Détail du Programme finançant la recherche* :

Projet faisant l'objet d'une demande de subvention à l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse et l'EPAGE HuCA (Etablissement Public d'Aménagement et de Gestion des Eaux Huveaune – Côtiers – Aygalades). La subvention intègre l'ensemble des frais de fonctionnement de la thèse (analyses, matériel in situ, frais de communication, missions). Le projet déposé à l'Agence de l'Eau inclut un comité technique semestriel pour partager les résultats avec les acteurs locaux de l'eau sur le territoire entre Marseille et Toulon (AMPM, EPAGE HuCA, Parc Naturel Régional de la Sainte-Baume, Région Sud-PACA, Conseil Départemental, Agence de l'Eau).

Trois sites labélisés SNO sont inclus dans le projet (Port-Miou, Dardennes, Le Castellet) – SNO Karst et SNO Renoir.

Références bibliographiques citées

- Arfib B. (2010) Cavités de la Sainte Baume : contexte hydro-spéléologique du gouffre du Petit Saint Cassien. *Karst et grottes de France*, P. Audra ed. Karstologia Mémoires 19. 358 p. <https://hal.science/hal-01458720v1>
- Baker A., A Hartmann, W Duan, S Hankin, L Comas-Bru, M O. Cuthbert, P C. Treble, J Banner, D Genty, L M. Baldini, M Bartolomé, A Moreno, C Pérez-Mejías, M Werner (2019) Global analysis reveals climatic controls on the oxygen isotope composition of cave drip water. *Nat Commun* 10, 2984. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11027-w>

- Birkel C., J Miller, A Watson, DA Trinh, AM Durán-Quesada, R Sánchez-Murillo, C Soulsby, S Terzer-Wassmuth, D Tetzlaff, S Uhlenbrook, Y Vystavna, K Yoshimura (2025) Demystifying the art of isotope-enabled hydrological and climate modelling. *Science of The Total Environment*, Vol 959 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178242>
- Garin Thibaut (2022) Contraindre la recharge, les modalités et les structures d'écoulement en contexte carbonaté - Application aux ressources en eau des bassins versants de l'Huveaune et de Port-Miou (SE France). Thèse de doctorat de l'université Aix-Marseille. 368 pages. <https://theses.hal.science/tel-04078228v1>
- Jasechko S., SJ Birks, T Gleeson, Y Wada, PJ. Fawcett, ZD. Sharp, JJ. McDonnell, JM. Welker (2014) The pronounced seasonality of global groundwater recharge, *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2014WR015809>
- Jouves Johan (2018) Origine, caractérisation et distribution prédictive des structures karstiques. De la karstologie aux modèles numériques 3D. Thèse de doctorat de l'université Aix-Marseille. 256 pages. <https://theses.hal.science/tel02178707/>
- Mazzilli, N., Guinot, V., Jourde, H., Lecoq, N., Labat, D., Arfib, B., Baudement, C., Danquigny, C., Dal Soglio, L., and Bertin, D. (2019) KarstMod: A modelling platform for rainfall - discharge analysis and modelling dedicated to karst systems, *Environ. Model. Softw.*, 122, 103927, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.015>
- Nlend B., F. Huneau, E. Garel, S. Santoni, T. Leydier, (2025) Rainfall and groundwater isotopes to investigate aquifer recharge mechanisms and seasonality in the Mediterranean region. Implications for long-term groundwater sustainability in the climate change context. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 61, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102671>
- Priestley, S. C., A. Baker, M. Shanafield, W. Timms, M. S. Andersen, and M. de Lourdes Melo Zurita (2025), Groundwater recharge of fractured rock aquifers in southeast Australia is episodic and controlled by season and rainfall amount, *Geophys. Res. Lett.*, 52, e2024GL113503, <https://doi.org/10.1029/2024GL113503>
- Richieri B., V. Sivelle, A. Hartmann, D. Labat, M. Muniruzzaman, G. Chiogna (2025) LuKARS 3.0: a high-performance computing software to model flow and transport processes in karst aquifers. *Environmental Modelling & Software*. Vol 193. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106642>
- Sauquet E; Torremocha E; Thirel G; Evin G; Arnaud P; Bonneau J ; Branger F; Caballero Y; Colléoni F; Ducharme A; Gailhard J; Hendrickx F; Héraud L; Hingray B; Huang P ; Lanini S; Le Lay M; Louise M; Monteil C; Munier S; Perrin C; Robelin O; Rousset F ; Strohmenger L; Tocquer F; Vergnes JP, (2025) Évolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement, <https://doi.org/10.57745/MN29RG>, Recherche Data Gouv, V7
- Sivelle, V., Cinkus, G., Mazzilli, N., Labat, D., Arfib, B., Massei, N., Cousquer, Y., Bertin, D., and Jourde, H. (2025) Improvement of the KarstMod modelling platform for a better assessment of karst groundwater resources, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 29, 1259–1276, <https://doi.org/10.5194/hess-29-1259-2025>
- Soubeyroux JM, B Dubuisson, S Bernus, R Samacoïts, F Rousset, et al.. A quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? partie 1. *Meteo-France*. 2024. <hal-04797481v3>
- Treble P.C., A Baker, NJ Abram, JC. Hellstrom, J Crawford, MK. Gagan, A Borsato, AD. Griffiths, P Bajo, M Markowska, S C. Priestley, S Hankin, D Paterson (2022) Ubiquitous karst hydrological control on speleothem oxygen isotope variability in a global study. *Commun Earth Environ* 3, 29. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00347-3>
- Xanke J., N. Goldscheider, M. Bakalowicz, JA. Barberá, S. Broda, Z. Chen, M Ghanmi, A. Günther, A. Hartmann, H. Jourde, T. Liesch , M. Mudarra, M. Petitta, N.Ravbar, Z. Stevanović (2024) Carbonate rocks and karst water resources in the Mediterranean region. *Hydrogeol J* 32, 1397–1418. <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02810-1>

Directeurs de thèse proposés*

Directrice HDR proposée*

Nom - Prénom : M^{me} VALLET-COULOMB Christine

Corps : Professeur

Laboratoire : CEREGE, équipe RHYCA

Adresse mail : vallet@cerege.fr

Choix de cinq publications récentes (souligner éventuellement les étudiants dirigés co-signataires) :

Chávez-Espinoza D., Kuppel S., Peugeot C., Yoshimura K., **Vallet-Coulomb C.** (2025) Sensitivity of Stable Isotope Dynamics to Parametric and Conceptual Choices in Critical Zone Hydrological Modelling—A Case Study in Tropical Africa. *Hydrological processes*, 2025, <https://doi.org/10.1002/hyp.70337>, <https://hal.science/hal-05380253v1>

Alexandre A., Outrequin C., **Vallet-Coulomb C.**, et al. (2025). What does the triple isotopic composition of oxygen in precipitation, groundwater, soil water, plant water, and phytoliths reveal about current and past hydrological cycles? *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 130. <https://doi.org/10.1029/2024JG008615>, <https://hal.science/hal05317209v1/document>

- Voigt C., **Vallet-Coulomb C.**, Piel C., Alexandre A. (2022) ^{17}O -excess and d -excess of atmospheric water vapor measured by cavity ring-down spectrometry: Evidence of a matrix effect and implication for the calibration procedure. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 36(6). <http://doi.org/10.1002/rcm.9227>. <https://hal.science/hal-03539023v1/>
- Outrequin C., Alexandre A., **Vallet-Coulomb C.**, Piel C., Devidal S., Landais A., Couapel M., Mazur J.C., Peugeot C., Pierre M., Prié F., Roy J., Sonzogni C., Voigt C. (2021) The triple oxygen isotope composition of phytoliths, a new proxy of atmospheric relative humidity: controls of soil water isotope composition, temperature, CO_2 concentration and relative humidity. *Climate of the Past* 17, 1881–1902, 2021. <https://doi.org/10.5194/cp-17-1881-2021>. <https://hal.science/hal03353205>
- Mahamat Nour A., **Vallet-Coulomb C.**, Gonçalves J., Sylvestre F., Deschamps P. (2021) Rainfall discharge relationship and water balance over the past 60 years within the Chari-Logone subwatersheds, Lake Chad basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35, 100824. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100824>. <https://hal.science/hal-03234923>

Thèses encadrées ou co-encadrées au cours des quatre dernières années*

Nom : Diego Chavez-Espinoza

Intitulé : Water stable isotopes for exploring critical zone dynamics in the Ouémé Basin

Type d'allocation : MERS

Date de début de l'allocation de doctorat : octobre 2022

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : prévue juillet 2026

Programme finançant la recherche : EC2CO (projet WAWAPiso - West African WATER Pathways : regional monitoring and hydrological modelling with stable ISotopes) Situation

actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) :

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : 50% (coencadrement avec Sylvain Kuppel, GET Toulouse)

Nom : Mahamat Taher Mahamat

Intitulé : Caractérisation des aquifères du lac Fitri (Tchad) : approches géologiques, hydrodynamique et géochimique

Type d'allocation : Bourse SCAC + ARTS

Date de début de l'allocation de doctorat : juin 2024 Date

de soutenance (si la thèse est soutenue) :

Programme finançant la recherche : projet « African Research Initiative for Scientific Excellence » (ARISE, UE-UA-AAS). Impact du changement climatique sur les zones humides du bassin du lac Tchad et ses conséquences sur la recharge des nappes.

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) :

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : 33% (coencadrement avec Abdallah Mahamat Nour , Université de N'Djamena et Florence Sylvestre, CEREGE)

Autre directeur proposé*

Nom - Prénom : M. ARFIB Bruno

Corps : Maître de conférences Hors Classe.

Laboratoire : CEREGE, équipe RHYCA

Adresse mail : arfib@cerege.fr

Choix de cinq publications récentes (souligner éventuellement les étudiants dirigés co-signataires) :

- Rispal N., **B. Arfib**, P. Audra, P. Henry, B. Viguier, A. Zappelli, L. Mocochain, M. Jagercikova, **C. Vallet-Coulomb**, H. Miche, and L. Cadilhac (2026) Impact of seasonal snow on the recharge of a mountain karst aquifer under climate change: the Dévoluy case study (Southern Alps, France). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* [egusphere-2025-5654](https://doi.org/10.5194/hess-2025-5654)
- Pellet H., P. Henry, S. Tournon, **B. Arfib**, C. Montoya, D. Lecouivre, L. Vanrell (2026) Oceanographic and hydroclimatic data explain depressed water level in the coastal karst hosting the decorated Paleolithic Cosquer cave (France). *Science of the Total Environment*, 1012, pp.181149. [10.1016/j.scitotenv.2025.181149](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.181149). [hal-05428996](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-05428996)
- Sivelle, V., G. Cinkus, N. Mazzilli, D. Labat, **B. Arfib**, N. Massei, Y. Cousquer, D. Bertin, and H. Jourde (2025) Improvement of the KarstMod modelling platform for a better assessment of karst groundwater resources, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 29, 1259–1276, <https://doi.org/10.5194/hess-291259-2025>.
- Pellet, H., **Arfib, B.**, Henry, P., Tournon, S., and Gassier, G. (2024) Mesoscale permeability variations estimated from natural airflows in the decorated Cosquer Cave (southeastern France), *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 28, 4035–4057, <https://doi.org/10.5194/hess-28-4035-2024>.
- Garin T., **B. Arfib**, B. Ladouche, J. Goncalves, B. Dewandel (2021) Improving hydrogeological understanding through well-test interpretation by diagnostic plot and modelling: a case study in an alluvial aquifer in France. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02426-9>.

Thèses encadrées ou co-encadrées au cours des quatre dernières années*

Nom : Thibaut GARIN

Intitulé : Contraindre la recharge, les modalités et structures d'écoulement en contexte carbonaté : Application aux ressources en eau des bassins versants de l'Huveaune et de PortMiou (SE France).

Type d'allocation : 50% Région PACA Emploi jeune doctorant – 50% BRGM

Date de début de l'allocation de doctorat : Nov. 2018

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : 15/12/2022

Programme finançant la recherche : Agence de l'Eau, Conseil Départemental 13, Métropole AMP

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) : CDI en collectivité territoriale gestion de l'eau (Dijon) depuis septembre 2023

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : 50% (co-direction et co-encadrement avec J. Goncalves (CEREGE), B. Ladouche (BRGM), Benoit Dewandel (BRGM))

Nom : Hugo PELLET

Intitulé : La dynamique des écoulements d'air et d'eau dans un massif carbonaté karstique côtier et impact sur l'altération des parois : application à la grotte Cosquer et l'état de conservation de ses parois et de ses œuvres

Type d'allocation : 50% AMU (bourse Présidence), 50 % LRMH (bourse Ministère de la Culture)

Date de début de l'allocation de doctorat : Déc 2021

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : 27/02/2025

Programme finançant la recherche : Institut ARKAIA, Direction Régional des Affaires Culturelles

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) : Post-Doc LAMPEA & DRAC (2025, 2026), Post-Doc Canada (2026 -)

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : 50% (co-direction et co-encadrement avec Pierre Henry (CEREGE) et Stéphanie Tournon (LRMH))