

PROPOSITION DE SUJET DE THÈSE

ANNÉES UNIVERSITAIRES 2025 – 2028

Evolution des interactions Eaux de surface / Eaux souterraines dans un contexte de changement climatique : étude couplée de la variabilité régionale et des processus hydrologiques à l'échelle de l'hydrosystème

Résumé

Les interactions entre les eaux de surface (SW) et les eaux souterraines (GW) sont complexes et peu étudiées, bien qu'elles influencent significativement la recharge des nappes et la résilience des cours d'eau. Les conditions hydroclimatiques sont des moteurs essentiels pour ces flux d'eau, mais la pression anthropique a également un impact croissant sur leur évolution. Pour être capables de modéliser correctement les processus qui contrôlent ces interactions, des observations de terrain à haute résolution et sur de longues périodes sont indispensables. L'objectif de la thèse est d'approfondir la compréhension des relations SW/GW, en examinant leurs variations spatio-temporelles, tant à l'échelle régionale qu'à celle de l'hydrosystème. Le premier axe de recherche se concentrera sur l'identification des facteurs qui expliquent les variations spatiales et temporelles (par une analyse des tendances) des interactions entre cours d'eau et nappes, à l'échelle régionale. Le second axe consistera en une analyse détaillée des processus à l'échelle de plusieurs hydrosystèmes (observatoires), afin de tester et valider des approches de modélisation. Les résultats de ces travaux fourniront une description des facteurs de contrôle des interactions SW/GW et de leur impact sur la ressource en eau souterraine, en prenant en compte les pressions anthropiques. La thèse s'appuiera sur les réseaux d'observations des bases de données hydroclimatiques publiques nationales à l'échelle régionale et sur le réseau des observatoires OZCAR & Zones Ateliers à l'échelle des hydrosystèmes.

Mots-clés : Ressources en eau, tendances, hydrologie, approche multi-échelles, observatoires

Evolution of surface water/groundwater interactions in the context of climate change: coupling the study of regional variability and hydrological processes at a hydrosystem scale

Summary

The interactions between surface water (SW) and groundwater (GW) are complex and poorly studied, despite their significant influence on groundwater recharge and river resilience. Hydroclimatic conditions are key drivers of these flows, but increasing anthropogenic pressure also affects their evolution. Accurate modeling of the processes controlling these interactions requires high-resolution, long-term field observations. This thesis aims at understanding of SW/GW interactions by exploring their spatio-temporal variations at both regional and hydrosystem scales. The first research focus will identify factors explaining spatial and temporal variations in SW/GW interactions at the regional scale, through trend analysis. The second will analyse processes in detail at several hydrosystem observatories to test and validate modelling approaches. The results will describe the factors controlling SW/GW interactions and their impact on groundwater resources, considering human pressures. The thesis will use national hydroclimatic observation networks as well as the OZCAR & Zones Ateliers observatory network.

Keywords: Water resources, trends, hydrology, multi-scale approach, observatories

1 Problématique scientifique

L'impact du changement global sur la disponibilité et la qualité de l'eau douce est principalement associé à des changements dans les extrêmes hydrologiques, par exemple les sécheresses ou les inondations (e.g. Blöschl et al., 2019 ; Vicente-Serrano et al., 2019 ; Trambly et al., 2020 ; Lorenzo-Lacruz et al., 2022 ; Trambly et al., 2024). L'évolution future des pluies efficaces pour la recharge des eaux souterraines et les écoulements de surface est actuellement très incertaine sur les régions européennes (GIEC, 2021). De nombreuses études portent sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau (Cramer et al., 2018 ; Dayon et al., 2018 ; Stigter et al., 2023). Cependant, elles abordent souvent de manière séparée les eaux de surface (SW) et les eaux souterraines (GW). Nous avons par conséquent peu d'informations sur l'évolution des relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines (SW/GW), dont la complexité et le caractère multiple de leurs échelles d'interaction, régissent une part non négligeable du comportement de ces deux compartiments. En effet, ces interactions sont partie prenante de la recharge des nappes (Bauer et al., 2005 ; Vergnes et al., 2018), de la résilience des cours d'eau en période de sécheresse (Bonnet et al., 2020), des phénomènes d'inondation par remontées de nappe ou crues karstiques (Pinault et al., 2005 ; Charlier et al., 2019 ; Bonnet et al., 2020), etc. En outre, il n'est pas possible d'effectuer des mesures directes de ces interactions SW/GW, hétérogènes dans l'espace (Guillaumot et al., 2024) et variables à l'échelle saisonnière (Bonnet et al., 2020). Il est donc difficile d'évaluer leurs tendances à l'échelle régionale, et de voir en quoi elles traduisent la variabilité des réponses des hydrosystèmes de surface et souterrains, aux évolutions du climat et aux activités anthropiques.

Les conditions hydroclimatiques sont généralement considérées comme les principaux moteurs des flux d'eau de surface et de la recharge des eaux souterraines, ce qui les rend très vulnérables au changement climatique (Mohan et al., 2018). Cependant, au cours des dernières décennies, la pression anthropique a augmenté en raison des changements dans les modes de consommation d'eau et d'utilisation des terres (e.g. Haas et Birk, 2019). A l'échelle européenne, les incidences des activités anthropiques sont comparables à celles causées par l'évolution des conditions hydroclimatiques (Teuling et al., 2019), au point qu'elles l'emportent parfois sur les variations des flux naturels (Riedel et Weber, 2020).

Des approches de modélisation de la pluie efficace permettent de prendre en compte ces conditions changeantes à large échelle (Lanini et Caballero, 2021 ; Martinsen et al., 2022 ; Seidenfaden et al., 2023). Cependant, elles présentent l'inconvénient de ne pouvoir être facilement confrontées à des observations in situ. Les séries temporelles hydrologiques des mesures de débit et de piézométrie restent donc un point de référence essentiel pour étudier les interactions SW/GW et les changements qu'elles peuvent provoquer sur les ressources en eau. Il est donc crucial de porter les efforts de recherche sur la compréhension des facteurs qui contrôlent la variabilité des interactions SW/GW et leur sensibilité au changement global (climatique et évolution des usages de l'eau), en analysant conjointement les observations piézométriques, hydrométriques, climatiques et anthropiques (prélèvements).

2 Objectifs scientifiques et approches envisagées

L'objectif de cette thèse est de caractériser l'évolution historique et actuelle des interactions entre les eaux de surface (SW) et les eaux souterraines (GW), en intégrant dans la mesure du possible l'influence des activités anthropiques. Elle vise également à mieux comprendre les processus qui régissent leur variabilité et leur rôle potentiel dans la modulation ou

l'amplification des impacts du changement climatique sur les ressources en eau, en particulier lors des événements hydroclimatiques extrêmes comme les sécheresses et les crues.

Le premier axe de recherche envisagé visera à qualifier la variabilité spatiale et temporelle des interactions SW/GW à large échelle (France/Europe). Les questions qui se posent portent sur l'identification des descripteurs (physiographie, hydroclimatologie, géologie, pédologie, occupation et usage du sol, ...) susceptibles d'expliquer les contrastes régionaux et sur une meilleure connaissance des variables qui contrôlent les évolutions temporelles. Une analyse spécifique de la cohérence des tendances entre eaux de surface et eaux souterraines au sein des bassins sera réalisée. Elle permettra de discuter des effets des descripteurs identifiés sur la variabilité régionale et temporelle des interactions.

Plusieurs étapes sont envisagées : 1 - sélection des bassins versants disposant de données de débits et de niveaux piézométriques et caractérisation fine de ces bassins versants (cf. [Makaho](#), Camels-Höge 2024) ; 2 – analyse indépendante sur les jeux de données de surface et souterraines, sur des ensembles réputés homogènes aux échelles locales et régionales (cf. tests de stationnarité avec cohérence spatiale, Renard et al., 2008) ; 3 – identification et caractérisation des descripteurs pouvant contrôler les évolutions constatées ; 4 – analyse des cohérences entre signaux, à l'aide de méthodes statistiques (tests de tendance, d'homogénéité, analyse de matrice de corrélation, classification hiérarchique...) et discussion des résultats.

Ce premier axe fournira ainsi une liste de descripteurs qui contrôlent les interactions SW/GW à large échelle (régionale) avant de basculer vers la petite échelle (hydrosystème), pour vérifier de manière fine comment ils influencent les processus d'écoulement.

Le second axe de recherche visera un changement d'échelle pour l'analyse des processus décrivant les interactions SW/GW au sein des hydrosystèmes. On s'attardera ici à mieux comprendre comment ces interactions contrôlent les évolutions des flux en surface (débits) et en souterrain (recharge, variations piézométriques), en recherchant des évolutions tendancielle, des effets de seuil, ou des points de rupture.

Pour cela, une valorisation des bases de données du réseau piézométrique national du BRGM et des observatoires de la zone critique (réseau OZCAR & Zones Ateliers) permettra de travailler sur des systèmes pilotes - au fonctionnement hydrologique déjà connu – susceptibles de disposer de données de surface et souterraines sur plusieurs décennies. Une attention particulière sera portée à l'utilisation de données physico-chimiques afin de mieux décrire et quantifier les interactions (Binet et al., 2022 ; Le Mesnil et al., 2022). L'analyse des pressions anthropiques (occupation du sol, prélèvements, rejets...) sera également menée à cette échelle en confrontant les données de prélèvements aux évolutions de la réponse hydrologique (Charlier et al., 2015).

Les résultats attendus pour ce deuxième axe permettront de conceptualiser les interactions SW/GW et leur variabilité temporelle, en précisant le rôle des descripteurs préalablement identifiés dans le premier axe et discutant les conséquences des évolutions des pressions (occupation du sol, prélèvements, recharge, etc...) sur la ressource. Sur la base de modèles conceptuels établis sur une typologie de ces interactions, et en fonction de l'avancement des

travaux, les concepts proposés pourront être testés via des approches de modélisation globale (modèles réservoir ou IA).

3 Mise en œuvre

3.1 Programme de travail

Axe 1 - A partir d'une recherche de bassins possédant des stations hydrométriques et piézométriques (sélection des sites à partir des stations hydrométriques non influencées d'EXPLORE2, de la plateforme MAKACHO (<https://makaho.sk8.inrae.fr/>) et des piézomètres recensés sur ADES), il s'agira d'étudier les interactions SW/GW, à large échelle (nationale) ; l'analyse des tendances (statistiques descriptives, tendances monotones, analyses fréquentielles, etc.) et des extrêmes (hautes et basses eaux) se basera sur des outils de traitement du signal et statistiques (cohérence entre signaux, effet tampon des nappes, effets de seuil, ...). Les principaux descripteurs susceptibles d'influencer les évolutions constatées seront décrits et leur influence discutée.

Axe 2 - A partir d'une typologie des interactions et de descripteurs identifiés, un focus sera réalisé sur des observatoires possédant un suivi haute-fréquence et multi-échelles des différents compartiments de l'hydrosystème (bassins et sous-bassins emboîtés, nappes libres et/ou captives, ...), dans des contextes hydroclimatiques contrastés. L'analyse des interactions SW/GW sera réalisée sur la base d'une caractérisation des transferts (flux d'eau, gradients...) et des corrélations entre variables. La valorisation de donnée physico-chimiques (minéralisation, thermie ...) à travers par ex. l'étude des relations débit-concentration pourra être une piste pour mieux comprendre les processus d'échange entre compartiments. Cette approche locale au sein de bassins pilotes s'avère ici complémentaire d'une analyse de type 'big data' réalisée dans l'Axe 1. Les résultats de ces analyses seront traduits en termes de modélisation conceptuelle des processus et, dans la mesure du possible, testés à l'aide de modèles globaux, de type réservoir ou issus des approches IA.

3.2 Données

Les données valorisées dans le cadre de la thèse sont des données publiques issus des bases de données METEO France, hydroportail, ADES, etc. pour l'analyse large échelle, et des réseau OZCAR et Zones Ateliers pour l'analyse à l'échelle des hydrosystèmes.

Il n'est pas prévu d'acquisition de données dans le cadre de cette thèse.

4 Encadrement et modalités d'accueil

4.1 Ecole doctorale

Le(a) doctorant(e) sera inscrit à l'école doctorale GAIA de l'Université de Montpellier : <https://gaia.umontpellier.fr/>

4.2 Equipes encadrantes & partenariat

Le laboratoire d'accueil est le BRGM de Montpellier. Le partenariat est mis en place dans l'encadrement de la thèse entre 3 unités : [UMR G-Eau](#) (BRGM DE/AKS Montpellier – JB Charlier & Y Caballero), BRGM DE/AS Orléans (D Allier), et l'[INRAE Riverly](#) de Lyon (E

Sauquet). En plus des missions régulières à Orléans et Lyon, le/la doctorant-e basé-e à Montpellier aura des temps d'échanges par visio-conférence.

Les équipes BRGM de DE/AKS et DE/AS développent des outils de traitement du signal, et de calcul de la recharge pour identifier les principaux moteurs de l'évolution des niveaux de nappes et des débits de source (ESPERE, ESTHER, Analyse en ondelettes, etc...). Une des originalités de l'unité de recherche RiverLy réside dans la production d'outils, méthodes, modèles à destination de la sphère opérationnelle, notamment en appui aux politiques publiques (Fyre Climate, Fyre Hydro, J2000,..).

L'analyse des interactions eaux de surface et eaux souterraines à l'échelle des hydrosystèmes sera fortement basée sur les données des observatoires OZCAR et Zones Ateliers. Dans ce cadre, il sera notamment envisagé un partenariat avec d'autres laboratoires à travers la proposition d'un thème transverse 'interactions eaux de surface/eaux souterraines' qui pourrait s'appuyer sur la thèse, afin que le/la thésard(e) bénéficie de la mise à disposition des données et expertises sur des sites pilotes variés. Les équipes du BRGM sont impliquées dans le réseau OZCAR au sein notamment du Réseau Piézométrique National ADES et des SNO Karst et H+.

4.3 Financement de la thèse

La rémunération du/de la doctorant-e, et les missions seront portées par le BRGM, à travers le programme [Water4All](#).

4.4 Salaire

Rémunération brute mensuelle : 2 200€ (sur 12 mois)

5 Candidature

5.1 Profil et compétences recherchées

Ingénieur hydrogéologue ou hydrologue ou étudiant Master 2 avec affinité pour l'analyse statistique des séries temporelles, les analyses statistiques multivariées et la programmation, avec curiosité scientifique, naturaliste et intérêt pour la recherche démontrée par un stage de master ou de fin d'étude avec orientation recherche. Une bonne maîtrise des environnements de type R / Python sera appréciée.

5.2 Modalité de candidature

Pour postuler, les candidats doivent soumettre les documents suivants :

1) une lettre de motivation

2) un curriculum vitae (CV) à jour, comprenant les informations suivantes : nom complet, date de naissance, lieu de résidence actuel, formation, liste des stages (sujet, nom du superviseur, grade, etc.), publications (le cas échéant), expérience professionnelle (le cas échéant), intérêts scientifiques, activités complémentaires, etc. , expérience professionnelle (le cas échéant), intérêts scientifiques, qualifications complémentaires, réalisations et autres informations pertinentes.

3) une copie du (des) diplôme(s) de Master 2 (ou une lettre de l'université indiquant la date prévue d'obtention du diplôme) et des notes (avec une explication du système de notation).

4) Optionnel : une ou deux lettres de recommandation signées, avec les coordonnées des personnes de référence.

Contact pour postuler : Jean-Baptiste Charlier (j.charlier@brgm.fr)

Date limite de réception des dossiers par mail le 30 mai 2025.

Une sélection des candidats pour audition sera effectuée début juin, pour un entretien prévu fin juin - début juillet 2025.

Contacts pour tout renseignement :

Jean-Baptiste Charlier
j.charlier@brgm.fr
+33 (0)4 67 15 79 77
BRGM - D3E / NRE
1039, rue de Pinville
34000 Montpellier

Eric Sauquet
eric.sauquet@inrae.fr
+33 (0)6 42 95 84 50
INRAE – UR RiverLy
5, rue de la Doua - CS 20244
69625 Villeurbanne

6 Références

- Bauer, M., Eichinger, L., Elsass, P. et al. Isotopic and hydrochemical studies of groundwater flow and salinity in the Southern Upper Rhine Graben. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 94, 565–579 (2005). <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0500-5>
- Binet S., J.-B. Charlier, N Jozja, C. Défarge, J.-S. Moquet, 2022. Evidence of long term biogeochemical interactions in carbonate weathering: The role of planktonic microorganisms and riverine bivalves in a large fluviokarst system. *Science of the Total Environment*, 842, 156823. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156823>
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A. et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature* 573, 108–111 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- Bonnet, R., Boé, J., and Habets, F.: Influence of multidecadal variability on high and low flows: the case of the Seine basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 1611–1631, <https://doi.org/10.5194/hess-24-1611-2020>, 2020
- Charlier J.-B., B. Ladouche, and J.-C. Maréchal, 2015. Identifying the impact of climate and anthropic pressures on karst aquifers using wavelet analysis. *Journal of Hydrology*, 523:610-623. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.003>.
- Charlier J.-B., Moussa R., David P.-Y., Desprats J.-F., 2019. Quantifying peakflow attenuation/amplification in a karst river using the diffusive wave model with lateral flow, *Hydrological Processes*, 33:2337–2354. <https://doi.org/10.1002/hyp.13472>
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M. et al. Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Clim Change* 8, 972–980 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
- Gildas Dayon; Julien Boé; Éric Martin; Joël Gailhard. Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. *Comptes Rendus. Géoscience*, Volume 350 (2018) no. 4, pp. 141-153. doi : 10.1016/j.crte.2018.03.001. <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/articles/10.1016/j.crte.2018.03.001/>
- Guillaumot L., Simon Munier, Ronan Abhervé, Jean-Pierre Vergnes, Alexis Jeantet, Patrick Le Moigne, Florence Habets, (2024) Are regional groundwater models suitable for simulating wetlands, rivers and intermittence? The example of the French AquifR platform, *Journal of Hydrology*, Volume 644, 132019, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132019>.
- Haas, Johannes & Switanek, Matthew & Birk, S.. (2018). Analysis of hydrological data with correlation matrices: technical implementation and possible applications. *Environmental Earth Sciences*. 77. 10.1007/s12665-018-7469-4.
- Höge, M., Kauzlaric, M., Siber, R., Schönenberger, U., Horton, P., Schwanbeck, J., Floriancic, M. G., Viviroli, D., Wilhelm, S., Sikorska-Senoner, A. E., Addor, N., Brunner, M., Pool, S., Zappa, M., and Fenicia, F.: CAMELS-CH: hydro-meteorological time series and landscape attributes for 331 catchments in hydrologic Switzerland, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 5755–5784, <https://doi.org/10.5194/essd-15-5755-2023>, 2023.

Lanini S., Caballero Y. ESPERE , a Tool for Multimethod Aquifer Recharge Estimation: What's New with Version 2?. *Groundwater*, 2021, 59 (1), pp.5-6. (10.1111/gwat.13049). (hal-03710482)

Le Mesnil M., J.-B. Charlier, R. Moussa, Y. Caballero, 2022. Investigating flood processes in karst catchments by combining concentration-discharge relationship analysis and lateral flow simulation. *Journal of Hydrology*, 605, 127358 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127358>.

Lorenzo-Lacruz J., E. Morán-Tejeda, S.M. Vicente-Serrano, J. Hannaford, C. García, D. Peña-Angulo, C. Murphy, Streamflow frequency changes across western Europe and interactions with North Atlantic atmospheric circulation patterns, *Global and Planetary Change*, Volume 212, 2022, 103797, ISSN 0921-8181, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103797>.

Martinsen G., Bessiere H., Caballero Y., Koch J., Collados-Lara A.J., Mansour M., Stisen S., Developing a pan-european high-resolution groundwater recharge map – combining satellite data and national survey data using machine learning *Sci. Total Environ.* (2022), 10.1016/j.scitotenv.2022.153464

Mohan, C., Western, A. W., Wei, Y., and Saft, M.: Predicting groundwater recharge for varying land cover and climate conditions – a global meta-study, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 2689–2703, <https://doi.org/10.5194/hess-22-2689-2018>, 2018.

Pinault, J.-L., Amraoui, N., & Golaz, C. (2005). Groundwater-induced flooding in macropore-dominated hydrological system in the context of climate changes. *Water Resources Research*, 41, W05001. <https://doi.org/10.1029/2004WR003169>

Renard B., M. Lang, P. Bois, A. Dupeyrat, O. Mestre, et al.. Regional methods for trend detection: Assessing field significance and regional consistency. *Water Resources Research*, 2008, 44 (8), W08419.

Riedel, Thomas and Tobias Karl David Weber. "Review: The influence of global change on Europe's water cycle and groundwater recharge." *Hydrogeology Journal* 28 (2020): 1939 - 1959.

Teuling, A. J., de Badts, E. A. G., Jansen, F. A., Fuchs, R., Buitink, J., Hoek van Dijke, A. J., and Sterling, S. M.: Climate change, reforestation/afforestation, and urbanization impacts on evapotranspiration and streamflow in Europe, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 3631–3652, <https://doi.org/10.5194/hess-23-3631-2019>, 2019.

Seidenfaden I.K., M. Mansour, Hélène Bessiere, David Pulido-Velazquez, A. Højberg, K. Atanaskovic Samolov, L. Baena-Ruiz, H. Bishop, B. Dessì, K. Hinsby, N.H. Hunter Williams, O. Larva, L. Martarelli, R. Mowbray, A.J. Nielsen, J. Öhman, T. Petrovic Pantic, A. Stroj, P. van der Keur, W.J. Zaadnoordijk. Evaluating recharge estimates based on groundwater head from different lumped models in Europe, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 47, 2023, 101399, ISSN 2214-5818, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101399>.

Stigter, T.Y., Miller, J., Chen, J. et al. Groundwater and climate change: threats and opportunities. *Hydrogeol J* 31, 7–10 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02554-w>

Tramblay, Yves; Sauquet, Éric; Arnaud, Patrick; Rousset, Fabienne; Soubeyroux, Jean-Michel; Jeantet, Alexis; Munier, Simon; Vergnes, Jean-Pierre, 2024, "Scénarios d'extrêmes hydrologiques", <https://doi.org/10.57745/2XDJ5H>, Recherche Data Gouv, V2

Tramblay, Y., Villarini, G., Saidi, M.E. et al. Classification of flood-generating processes in Africa. *Sci Rep* 12, 18920 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23725-5>

Vicente-Serrano, S. M., Peña-Gallardo, M., Hannaford, J., Murphy, C., Lorenzo-Lacruz, J., Dominguez-Castro, F., et al. (2019). Climate, irrigation, and land cover change explain streamflow trends in countries bordering the Northeast Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 46, 10821–10833.