

Fiche projet Accord Cadre ZABR – Agence de l'eau

2025-B88-HOTSPOT - IGE/RIVERLY - Compréhension des hot-spots de connectivité hydrologique dans les petits bassins de tête sous climat méditerranéen

INTITULE DU PROJET : Compréhension des hot-spots de connectivité hydrologique dans les petits bassins de tête sous climat méditerranéen - Hotspot

Responsable scientifique du projet:

- Nom DUWIG
- Prénom Céline
- Organisme du contact : IGE Grenoble UMR 5001
- Fonction : DR IRD
- Courriel : celine.duwig@ird.fr
- Téléphone : 04 76 63 58 92

Référent (s) administratif(s) :

- Nom : SAINT ANDRE
- Prénom : Emma
- Organisme du contact : UGA
- Fonction : gestionnaire administrative
- Courriel : emma.saint-andre@univ-grenoble-alpes.fr
- Téléphone : 04 76 74 31 61

EQUIPES DE RECHERCHES ZABR CONCERNEES et CONTACT SCIENTIFIQUE DE L'EQUIPE

IGE UMR 5001 Grenoble : **Céline Duwig**, Guillaume Nord, Cédric Legoût, Jean Martins, Lorenzo Spadini, Matthieu Blanc, Stéphane Boukraoui

INRAE RIVERLY Lyon : **Matthieu Masson**, Flora Branger, Marina Coquery, Nico Hachgenei, Jean Marçais

AUTRES PARTENAIRES

(Préciser leur degré d'implication et leur accord)

Recherche : PACTE, équipe Environnements, UMR 5194 (UGA, CNRS, Sciences Po) - Grenoble : **Pauline Dusseux** et CERMOSEM (centre de recherche localisé au cœur du site d'étude) : Nicolas Robinet. Cette équipe ne fait pas partie de la ZABR et interviendra de ce fait en sous-traitance de l'équipe IGE. Ces équipes se connaissent bien et travaillent déjà ensemble.

THEMATIQUE NATURE ET OPERATION (ne rien compléter))

- Thématique : Etude recherche et réseau de suivi
- Nature du projet : Etude générale et recherche
- Type d'opération : Recherche et innovation
- Intitulé de l'opération :

LOCALISATION DU PROJET: (se remplit automatiquement -Ne rien remplir)

- Commune principale et numéro INSEE : à compléter
- Sous bassin versant
- Nom du cours d'eau

- Contrat (si intégré dans un contrat de rivière, un SAGE ou un autre contrat avec l'agence de l'eau)

RESUME DU PROJET GLOBAL

• Résumé : 3000 caractères

Une particularité des bassins versants de tête sous climat méditerranéen est la très forte dynamique temporelle de la réponse hydrologique. Le bassin de méso-échelle de la Claduègne en Ardèche fait partie de l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes Vivarais) qui étudie les phénomènes hydrométéorologiques parfois extrêmes (pluies intenses, crues éclairs). Pourtant, le bassin Auzon-Claduègne est classé en zone de répartition des eaux, c.a.d. une zone présentant une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins (arrêté préfectoral n°07-2016-06-20-005). Il existe donc une alternance marquée entre périodes humides et sèches. Sur le bassin de la Claduègne, une partie prépondérante des flux d'eau et de matières associées sont exportés hors du bassin en quelques heures, lors des plus forts débits de crue (Hachgenei et al., 2024, Projet IDESOC). Le ruissellement est un processus très variable spatialement et temporellement qui a des répercussions importantes sur les volumes d'eau écoulés. Cependant, le ruissellement ne peut pas expliquer, à lui seul, les crues éclairs. Les écoulements de subsurface contribuent également pour beaucoup aux écoulements de crue. Ceux-ci incluent toute une palette de processus, et donc de temps de transfert et de chemins de l'eau, avec des répercussions sur la qualité de l'eau. Les écoulements de subsurface jouent par ailleurs un rôle crucial en période sèche pour soutenir les débits. Nous proposons d'acquérir des données dans des sous-bassins de tête par télédétection (drone), avec un radar altimétrique pour décrire finement l'état d'activité du réseau hydrographique intermittent à différentes saisons, et par imagerie multispectrale pour la caractérisation des états de surface qui déterminent les processus d'infiltration et de ruissellement. Ces images seront complétées par des observations visuelles du ruissellement grâce à la participation des agriculteurs et de la population du bassin. Nous proposons également des collectes de ruissellement sur versant et d'eau de crue dans des sous-bassins de tête avec occupations du sol différentes pour le traçage de l'eau. Ces nouvelles données permettront d'approfondir la compréhension de l'origine des écoulements dans le réseau hydrographique intermittent à cette échelle clé entre versant et bassin versant, à l'interface entre surface et subsurface. Cette connaissance permettra in fine d'améliorer la modélisation hydrologique distribuée et donc la gestion des ressources en eaux, enjeu crucial sur ce bassin agricole. Les résultats intéressent les gestionnaires des ressources en eau, comme l'ETPB du Bassin Versant de l'Ardèche. Ce projet vient en complément d'une demande de contrat doctoral à l'Ecole Doctorale STEP de l'UGA. La méthodologie appliquée dans ce projet pourra être étendue à d'autres bassins versants avec des usages du sols très hétérogènes et des rivières intermittentes, qui sont typiques des régions méditerranéennes.

ENCART 2025-HOTSPOT-IGE (Céline Duwig) (500 caractères espaces inclus)

- Tâche de l'équipe dans le projet
Suivi hydrologique, échantillonnage des eaux, acquisition et analyse des images par drone, analyse des états de surface, modélisation. L'équipe de l'IGE travaillera en collaboration avec le laboratoire PACTE pour la partie télédétection et en lien avec les agriculteurs. L'équipe Environnements du laboratoire PACTE interviendra en sous-traitance en apportant son expertise pour le traitement/analyse de données spatialisées. Une antenne du laboratoire (le CERMOSEM) est implantée depuis 25 ans sur le bassin versant de la Claduègne et apporte ainsi sa connaissance fine du territoire d'étude (diagnostic de territoire).

ENCART 2025-HOTSPOT-RIVERLY (Matthieu Masson) (500 caractères espaces inclus)

- Tâche de l'équipe dans le projet
Caractérisation de la matière organique dissoute (MOD) et des traceurs ioniques et métalliques, participation à l'élaboration des empreintes physico-chimique des eaux et des modèles de mélange, modélisation hydrologique

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

(3 000 caractères espaces compris)

• Contexte général

Les bassins versants de méso-échelle ($\sim 10\text{-}10^3 \text{ km}^2$) sont généralement de taille adéquate pour la gestion des territoires (échelle des syndicats des eaux et de rivière), mais ils sont également particulièrement vulnérables aux changements globaux car les aquifères qui les supportent ne sont pas très abondants, surtout en région

de montagne, et ils sont mal connus. Dans les bassins versants de méso-échelle, caractérisés par une diversité des usages des sols et des pédo-lithologies, les masses d'eau de surface sont de petits cours d'eau, souvent intermittents, et très proches de multiples sources de contamination diffuses ou ponctuelles liées au développement urbain, au tourisme et à l'agriculture (Giri and Quiu, 2016). Ces cours d'eau ont une très faible capacité de dilution, exacerbée par des étés secs, typiques du climat méditerranéen. Ce climat est aussi caractérisé par une forte variabilité spatio-temporelle des pluies associées à des phénomènes souvent intenses. Sous ce climat, une partie prépondérante des flux d'eau sont exportés hors du bassin versant en quelques heures, lors des plus forts débits de crue (Hachgenei et al., 2024a). Lors de ces épisodes intenses, la formation des écoulements dans les bassins de tête dépend du ruissellement mais aussi des écoulements de subsurface selon leur connectivité avec le réseau hydrographique de surface qui dépend notamment de l'état d'humidité et de la présence de macropores dans les sols (Ozgen-Xian et al., 2023). Ces hotspots de connectivité hydrologique sont modifiés par les usages des sols, qui changent non seulement les types et la quantité d'écoulement mais aussi le transfert de contaminants chimiques et microbiologiques qui peuvent se retrouver in fine dans les écosystèmes aquatiques. Afin de pouvoir proposer une meilleure gestion de la ressource en eau dans les têtes de bassin, Il est très important de comprendre en détail les principaux mécanismes hydrologiques, qui contrôlent l'infiltration, l'apparition du ruissellement ou l'exfiltration et les flux rapides dans les sols à l'interface entre versant et rivière.

Les outils satellitaires permettent d'obtenir de multiples données sur les états de surface (végétation, humidité, niveau d'eau) mais leur résolution temporelle et spatiale n'est pas toujours adaptée aux bassins de méso-échelle, notamment pour décrire de façon détaillée les usages des sols, les états de surface et le réseau hydrographique (Dusseux et al., 2014). La télédétection par drone est un outil en pleine expansion qui offre de nouvelles perspectives pour le domaine de l'hydrologie à fine échelle (Vélez-Nicolás et al., 2021, Acharya et al., 2021). Ces possibilités d'observation et de mesures, flexibles et à très haute résolution spatiale, apparaissent comme complémentaires et ont une position intermédiaire entre les acquisitions satellitaires et les mesures in-situ. Ces observations permettent également d'obtenir des supports de communication intéressants avec les acteurs du territoire (Dinko and Nyantakyi-Frimpong, 2022).

- **Contexte ZABR :**

- **Thématique ZABR : Changement climatique et ressources. Question Q2 : Quels sont les impacts du changement global sur les ressources, sur le fonctionnement et les capacités de résilience des écosystèmes aquatiques ?**
- **Site Atelier ou Observatoire ZABR : Site « Olivier de Serres » – la Claduègne -SNO OHMCV et Zone Atelier « Rivières cévenoles » de la ZABR**
- **Besoin de connaissance Agence de l'eau : Thème transverse Eaux Souterraines**

FINALITE ET ATTENDUS OPERATIONNELS

(3 000 caractères espaces compris)

- **Objectifs scientifiques**

Trois projets antérieurs (ZABR-PHARMABV, ZABR-IDESOC et ANR-CHYPSTER) ont porté sur la caractérisation des contaminants (diffus ou ponctuels) et leur transfert depuis les sources jusqu'à l'exutoire du bassin de la Claduègne pendant les crues (Hachgenei et al., 2024b). Des modèles de mélange visant à tracer l'origine spatiale de l'eau dans le bassin ont été construits à l'aide des éléments traces métalliques analysés dans des sous-bassins de tête (Grandjouan et al., 2023 ; Perron, 2024 ; Hachgenei et al., 2025). Ces modèles ont mis en évidence l'effet de la géologie contrastée du bassin sur la composition des eaux à l'exutoire mais n'ont pas permis de discriminer les différentes occupations du sol. Cela est dû au fait que les usages des sols sont très fragmentés à l'échelle des sous-bassins de tête (~10¹-10² ha) et que les prélèvements manuels effectués pour déterminer les sources des modèles de mélange ne fournissaient pas de signature de l'eau de ruissellement.

L'objectif de ce projet est de comprendre la formation des écoulements dans le réseau hydrographique de tête de bassin, et les voies de transfert de l'eau sous différentes occupations du sol.

Les objectifs détaillés sont :

- (i) Décomposer l'origine de l'eau à différentes échelles de temps en tenant compte des usages des sols et des voies de transfert (surface/subsurface) ;
- (ii) Collecter des informations détaillées sur les états de surface pour caractériser les propriétés hydro-dynamiques des sols de surface contrôlant le ruissellement hortonien, les flux à l'interface surface/sub-surface et cartographier l'extension du réseau hydrographique intermittent ;
- (iii) Comprendre et représenter les écoulements de subsurface qui soutiennent les débits de base en période d'étiage.

- **Attendus opérationnels**

Tout au long du projet, nous travaillerons avec des agriculteurs du bassin versant grâce aux contacts du CER-MOSEM. Suite à une réunion de début de projet pour échanger avec les agriculteurs intéressés à participer, nous suivrons leurs pratiques agricoles et partagerons nos résultats via la production de cartes. Les images acquises par drone sont un outil efficace de communication qui peut encourager la recherche participative (Dinko and Nyantakyi-Frimpong, 2022). Les agriculteurs et les habitants pourront aussi contribuer au projet en photographiant le ruissellement et l'exfiltration qui sont des processus rares et fugaces dont l'occurrence est informative pour évaluer les modèles de mélange. L'amélioration de la connaissance de l'aquifère est un enjeu pour la Claduègne amont qui constitue un réservoir biologique (SDAGE) assurant des apports de poissons à l'Auzon après assecs et zones refuges. Au-delà du projet, nos résultats permettront d'améliorer le modèle hydrologique distribué J2000P qui a déjà été mis en place pour le bassin de la Claduègne (Hachgenei et al., 2025). Ce modèle pourrait alors être utilisé comme outil d'aide à la gestion en co-construisant de nouvelles questions avec les gestionnaires de bassin, par exemple pour étudier l'impact des retenues collinaires et des forages sur l'hydrologie en s'inspirant du projet ICRA (OFB). Actuellement, le partage de la ressource en eau entre besoins pour l'agriculture, l'alimentation en eau potable et le maintien des écosystèmes est une problématique croissante sur le bassin. Ce modèle est aussi utilisé dans le projet ANR Chypster pour tester des scénarios de projection climatique.

Concernant les attendus plus généralisables en termes de diagnostic, projection et changement de pratiques, nous produirons un protocole d'acquisition de données drone selon le capteur utilisé. Concernant le capteur altimétrique, nous fournirons la méthode d'extraction de la surface libre et la production de cartes de réseau hydrographique actif. Les données d'images multi-spectrales nous permettront d'obtenir des indicateurs d'état de surface pour caractériser les propriétés hydro-dynamiques des sols de surface. Finalement, le couplage du modèle J2000P et Modflow permettra d'obtenir des données de caractérisation des propriétés physiques des aquifères superficiels utilisables pour un gestionnaire.

DESCRIPTIF DETAILLE

(4000 caractères espace compris) :

- **Méthodologie**

Le projet comporte 4 étapes :

1. Des gouttières collectant de l'eau de ruissellement de façon passive ont été récemment installées à mi-versant dans différents types d'occupation du sol homogène, afin de définir la signature géochimique du ruissellement. D'autres gouttières seront installées pour couvrir tous les types d'occupation de sol. Quelques piézomètres complèteront le dispositif afin d'échantillonner l'aquifère. Des traceurs (métaux, spectres UV-vis pour caractériser la matière organique, et analyses microbiologiques pour déterminer les indicateurs fécaux) seront analysés pour discriminer 4 sources au maximum par sous-bassin versant. Des échantillons d'eau prélevés automatiquement en crue dans les ruisseaux seront obtenus en déployant des capteurs de niveau (Nord et al., 2007) et des préleveurs automatiques du SNO OHMCV et en mettant à profit notre expertise en matière d'algorithmes de prélèvement. Les mêmes analyses seront réalisées sur ces échantillons de crue. Des modèles de mélange seront élaborés pour calculer la contribution des différentes sources (ruissellement sur différentes occupations du sol, eau de nappe) aux eaux de rivière à l'exutoire des sous-bassins versants.
2. Il est proposé d'obtenir de nouvelles données pour acquérir une connaissance plus fine des sols et du réseau hydrographique intermittent des mêmes sous-bassins versants de tête. Nous proposons d'utiliser la télédétection par drone pour obtenir des données à très haute résolution spatiale (~dm).

D'une part, nous envisageons d'utiliser un radar altimétrique embarqué sur drone (Bandini et al., 2020) pour cartographier le réseau hydrographique actif pour différentes conditions hydrologiques (sèches vs humides). Ce réseau est considéré comme le lieu où l'aquifère intercepte la surface (Bandini, 2016 ; Abhervé et al., 2023, 2024). D'autre part, nous prévoyons de tester l'imagerie multispectrale afin de caractériser les états de surface à haute résolution (e.g. Foerster et al., 2014). L'imagerie multispectrale est encore au stade prospectif et peut servir de proxys pour des paramètres tels que la couverture végétale, l'humidité et les caractéristiques des sols (propriétés hydrodynamiques, matière organique, humidité de surface).

3. En se rapprochant des agriculteurs avec lesquels nous avons déjà travaillé dans les projets précédents (Hachgenei et al., 2024b, Robinet et al., 2023), et en organisant une réunion d'échange en début de projet, nous espérons rassembler un groupe d'agriculteurs volontaires pour travailler avec nous. Les pratiques agricoles, les états de surface et l'observation du ruissellement et d'exfiltration seront explorés photos et des vidéos datées et localisées des processus hydrologiques. Ils pourront également échanger avec nous sur leurs pratiques agricoles sur les bassins de tête que nous suivrons.
4. Le modèle hydrogéologique MODFLOW sera utilisé pour chaque sous-bassin versant en lien avec les cartes d'extension du réseau hydrographique actif obtenues par drone. La méthode proposée par Abhervé et al. (2023, 2024) sera appliquée afin de déterminer la conductivité hydraulique et la porosité de l'aquifère. Une approche parcimonieuse en paramètres sera suivie en recherchant des propriétés hydrauliques effectives de l'aquifère. Le terme de recharge de la nappe sera extrait des simulations produites par le modèle distribué J2000P mis en place sur le bassin de la Claduègne dans le projet ANR CHYPSTER (Hachgenei et al., 2024 ; Hachgenei et al., 2025).

En résumé, les modèles de mélange apporteront une décomposition entre eau de subsurface et eau de ruissellement provenant des usages des sols dominants. La télédétection multispectrale apportera des informations sur les états de surface qui aideront à spatialiser l'occurrence du ruissellement en fonction des usages des sols. Enfin, la télédétection et la recherche participative servira à contraindre une modélisation hydrogéologique à base physique permettant de caractériser la capacité de stockage et les temps de transfert du compartiment souterrain.

LIVRABLES :

- SIG des réseaux hydrographiques actifs pour l'EPTB Ardèche et la communauté de communes Berg et Coiron (GEMAPI)
- Mode opératoire pour l'application d'un radar altimétrique embarqué sur drone pour la cartographie de l'extension du réseau hydrographique actif dans les bassins versants de tête
- Recherche participative avec les agriculteurs pour l'établissement de fiches explicatives vulgarisant les résultats (rôle joué par les écoulements de subsurface pendant les crues, capacité de stockage et dynamique de vidange des petits aquifères des têtes de bassin, impact des intrants agricoles sur la qualité de l'eau en fonction de la saison et des conditions hydrologiques etc...)
- Fiches de résultats individualisés pour les agriculteurs participants sur les états de surface de leurs parcelles et des cartes de réseaux hydrographiques grâce aux images de drone, des résultats sur le lien entre usage des sols et écoulements.
- Mise à disposition de données pluviométriques pour les agriculteurs grâce à la mise en place de télétransmission dans le cadre d'une réponse à l'AMI TERRAFORMA en cours.
- Et un livrable plus prospectif : application de la télédétection multispectrale pour caractériser les états de surface

DUREE DU PROJET: 2 ans

- Date de début : 01/01/2026
- Date de fin : 31/12/2028

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abhervé R et al., 2023. Calibration of groundwater seepage against the spatial distribution of the stream network to assess catchment-scale hydraulic properties. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 27, 3221–3239. <https://doi.org/10.5194/hess-27-3221-2023>
- Abhervé R. et al., 2024. Improving calibration of groundwater flow models using headwater streamflow intermittence. *Hydrological Processes*. 2024;38:e15167. <https://doi.org/10.1002/hyp.15167>
- Acharya B. S. et al., 2021. Unmanned Aerial Vehicles in Hydrology and Water Management: Applications, Challenges, and Perspectives. *Water Resources Res.* 57, e2021WR029925. <https://doi.org/10.1029/2021WR029925>
- Bandini F. et al., 2016. Water level observations from unmanned aerial vehicles for improving estimates of surface water–groundwater interaction. *Hydrological Processes*, 31 :4371-4383.
- Bandini F. et al., 2020. Unmanned Aerial System (UAS) observations of water surface elevation in a small stream: Comparison of radar altimetry, LIDAR and photogrammetry techniques. *Remote Sensing of Env.*, 237 :111487. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111487>
- Dinko, D. H., & Nyantakyi-Frimpong, H. , 2022. The Prospects and Challenges of Using Drone-Based Participatory Mapping in Human–Environment Research. *The Professional Geographer*, 75(3), 441–451. <https://doi.org/10.1080/00330124.2022.2103723>
- Dusseux P. et al., 2014. Agricultural practices in grasslands detected by spatial remote sensing, *Environmental Monitoring and Assessment*, vol 186, 12, 8249–8265, DOI:10.1007/s10661-014-4001-5
- Foerster S. et al., 2014. Assessment of sediment connectivity from vegetation cover and topography using remotely sensed data in a dryland catchment in the Spanish Pyrenees. *J Soils Sediments*,14:1982–2000. DOI 10.1007/s11368-014-0992-3
- Giri S. and Quiu Z., 2016. Understanding the relationship of land uses and water quality in twenty first century : a review. *J. Environ. Manage.*, 15 :17341-8. DOI:10.1016/j.jenvman.2016.02.029
- Grandjouan O. et al., 2023. Identification and estimation of hydrological contributions in a mixed land-use catchment based on a simple biogeochemical and hydro-meteorological dataset. *Hydrological Processes*, 37 (12), pp.e15035. <https://doi.org/10.1002/hyp.15035>
- Hachgenei, N., Branger, F., Nord, G., Masson, M., Legout, C., Perron, C., Duwig, C., Spadini, L, Coquery, M., Validation of water transit traced by a distributed hydrological model using a geochemical end-member mixing approach, EGU General Assembly 2025, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-15918, Vien-na, Austria.
- Hachgenei N., Nord G., Spadini L., Ginot P., Voiron C., Duwig C., 2024a. Transit time tracing using wetness-adaptive StorAge Selection functions - application to a Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology* 638, 131267. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131267>
- Hachgenei N., Robinet N., Baduel C., Nord G., Spadini L., Martins J.M.F., Duwig C., 2024b. Catchment-scale rapid transfer of livestock pharmaceuticals under Mediterranean climate. *Science of the Total Environment*, 166650 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166650>
- Nord, G., Boudevillain, B., Berne, A., Branger, F., Braud, I., Dramais, G., et al. (2017). A high space–time resolution dataset linking meteorological forcing and hydro-sedimentary response in a mesoscale Mediterranean catchment (Au-zon) of the Ardèche region, France. *Earth System Science Data*, 9(1), 221–249. <https://doi.org/10.5194/essd-9-221-2017>
- Ozgen-Xian I. et al. , 2023. Understanding the hydrological response of a headwater-dominated catchment by analysis of distributed surface–subsurface interactions. *Scientific reports* 12, 4669.
- Perron Clothilde, 2024. Mémoire de fin de stage : Traçage des chemins de l’eau à base de paramètres biogéochimiques caractérisant les occupations de sols et la géologie dans le bassin versant de la Claduègne, Ardèche. Mémoire de stage de M1 Sciences de l’Eau, Université de Lyon 2.
- Robinet et al., 2023. Diagnostic des usages et pratiques en zone rurale : enquêtes de terrain, suivis de qualité des eaux et modélisation hydrologique pour prédire l'évolution de la ressource en eau en Ardèche. Journée publique de restitution, PACTE – CERMOSEM, Nov 023, Mirabel (Ardèche), France ; 14 p (hal-04733961).
- Vélez-Nicolás M. et al., 2021. Applications of Unmanned Aerial Systems (UASs) in Hydrology: A Review. *Remote Sens.*, 13, 1359. <https://doi.org/10.3390/rs13071359>