

Dossier à remplir pour le bilan et la labellisation 2022-2026 d'un **Service National d'Observation (SNO) SIC**

Nota : Ce dossier ne doit pas excéder **40 PAGES (hors annexe)**, avec une police de caractère et un interligne raisonnables. La liste exhaustive des publications et des conférences au cours de la période (2017-2021) ainsi que les lettres de soutien sont à fournir en annexe. Pour faciliter les évaluations, il est recommandé aux porteurs de suivre la trame proposée.

Les porteurs de projet sont invités à lire très attentivement la définition des services labellisés du domaine SIC de cet appel à labellisation 2021 qui présente des nouveautés importantes.

Document à soumettre au plus tard le Vendredi 16 juillet 2021

DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SERVICE (5 PAGES MAXIMUM)

A1- Appartenance du service (ANO¹ 1-> 3) : ANO-1 Zone Critique

A2- Nom du service : H+ réseau des sites de recherche en hydrogéologie

A3- Adresse URL du site web du service : <http://hplus.ore.fr/>

A4- Résumé du service (1/2 page maximum) :

Le réseau H+ est le réseau d'observation à long terme pour la recherche en hydrogéologie. Son objectif principal est de produire des données de surveillance et des données expérimentales sur les structures et les processus de subsurface à partir de sites hautement instrumentés. Les données H+ sont mises à la disposition de la communauté scientifique via une base de données en ligne (hplus.ore.fr). Lors de sa création en 2002, le réseau H+ se concentrait principalement sur des questions scientifiques concernant l'impact de l'hétérogénéité sur les processus d'écoulement, de transport et de réaction, en mettant l'accent sur le lien entre les données et les modèles, et sur le développement de méthodes hydrogéophysiques. Depuis lors, les questions scientifiques abordées par les équipes H+ se sont diversifiées pour inclure notamment les interactions et les rétroactions entre les systèmes de subsurface et de surface, et pour développer des liens avec d'autres communautés, telles que les géochimistes, les hydrologues, les microbiologistes et les géomorphologues. Cette évolution a été renforcée par les interactions avec les réseaux de bassins versants (RBV), qui ont conduit à la création du projet d'équipement CRITEX en 2012 et de l'infrastructure de recherche sur la zone critique OZCAR en 2017. Les sites H+ servent de plateformes expérimentales pour accueillir des équipes internationales qui développent de nouvelles techniques de surveillance et d'imagerie de la subsurface. Le SNO H+ a récemment coordonné le projet ITN ENIGMA (European training Network for in situ imaGing of dynaMic processes in heterogeneous subsurfAce environments) et sert de plateforme expérimentale à de nombreux projets ANR ou ERC. Deux sites du réseau sont respectivement sites pilotes de l'IR européenne eLter et du PIA3 Terra Forma.

A5- Nom du responsable (nom, titre, adresse électronique) : Olivier Bour, Professeur, Olivier.Bour@univ-rennes1.fr

A6- Laboratoire : Géosciences Rennes UMR 6118 CNRS Université de Rennes

¹ Action Nationale d'Observation (ANO) : ANO-1 **Zone Critique** ; ANO-2 **Agroécosystème** ; ANO-3 **Côtier Littoral**

A7- OSU ou établissement/organisme de rattachement : Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes

A8- Autre(s) organisme(s) associé(s) (IRD, CNES, Météo-France, INRAe) :

BRGM, via le site associé d'hyderabad

A9- Signature du responsable :



Olivier Bour

A10- Signature du directeur OSU gestionnaire (ou établissement/organisme de rattachement) :

Voir annexe 8 (Lettre de soutien du directeur de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, pilote du SNO H+)

Jean-Raynald DE DREUZY
Directeur de l'OSUR



A11- Autres laboratoires et OSU intervenant dans le fonctionnement du service (pour chaque laboratoire concerné ou équipe impliquée, indiquer le nom et l'adresse électronique du responsable, et donner en deux lignes maximum, la nature de l'implication dans le service, hors exploitation scientifique) :

- **Pilotage du site de Ploemeur** (resp. Laurent Longuevergne, laurent.longuevergne@univ-rennes1.fr) : UMR Géosciences Rennes (UMR 6118), OSU Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR)
- **Pilotage du site du Larzac** (resp. Cédric Champollion, cedric.champollion@umontpellier.fr) : UMR Géosciences Montpellier (UMR 5243), OSU Observatoire de Recherche Méditerranéen en Environnement de Montpellier (OREME)
- **Pilotage du site de Poitiers** (resp. Gilles Porel, Gilles.Porel@univ-poitiers.fr) : IC2MP (UMR 7285)
- **Pilotage du LSBB** (resp. Konstantinos Chalikakis, konstantinos.chalikakis@univ-avignon.fr) : UMR EMMAH (UMR INRA-UAPV 1114), UMR Geosciences Azur (UMR 6526), UMS LSBB (UMS 3538 INSU/UAPV/UNS), OSU Observatoire de la Côte d'Azur (OCA)
- **Pitolage du site AUVERWATCH** (resp. Hélène Celle-Jeanton, helene.jeanton@univ-fcomte.fr): UMR Chrono-Environnement (UMR 6249), OSU Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC)
- **Equipe associée en hydrogéophysique** (resp. Ludovic Bodet, ludovic.bodet@upmc.fr): UMR METIS (UMR 7619)
- **Site associé d'hyderabad** (resp. Jean-Christophe Maréchal, jc.marechal@brgm.fr): BRGM

A12- Le service proposé consiste-t-il en une demande

- **de labellisation dans la continuité d'une labellisation existante (oui/non) ?**

Le cas échéant, décrire l'évolution du service (si pertinent, sinon indiquer 'pas d'évolution'):

Oui, il n'y a pas d'évolution majeure dans la structure du service. Les évolutions des thématiques scientifiques et la prospective d'intégration d'un nouveau site sont décrites dans le document.

- **de labellisation d'un nouveau service (oui/non) ?**

Si le nouveau service consiste en une évolution du périmètre d'un ou plusieurs services labellisés précédemment, préciser lesquels :

Non

A13- Lien avec une IR (oui/non) :

Si oui, préciser la (les) IR (inclure une lettre de soutien de la ou des IR en annexe au dossier) :

Oui, le SNO H+ est un des piliers de l'IR OZCAR dans laquelle il est fortement impliqué à travers l'étude du compartiment souterrain et l'imagerie géophysique. Les lettres de soutien de l'IR OZCAR pour les SNO ont été transmises directement au comité.

Si non, préciser les raisons :

A14- Le service proposé relève-t-il

- d'autres domaines de l'INSU, OA, TS ou AA (oui/non) ? et le(s)quel(s) ? Non
- d'autres instituts du CNRS (oui/non) ? et le(s)quel(s) ? Non

A15- Lien avec un pôle ou un centre de données (oui/non) :

Si oui, préciser le(s)quel(s) (*inclure une preuve d'appartenance ou d'adhésion en annexe au dossier*) : Oui, H+ est en forte interaction avec le centre de données d'OZCAR THEIA pour gérer les données sur le milieu souterrain au sein d'OZCAR.

Si non, préciser les raisons :

A16- Auto-évaluation via une analyse SWOT

Forces

- Le SNO H+ offre une plateforme de suivi long terme et d'expérimentation pour les jeunes chercheurs (doctorants, post-doctorants), qui bénéficient des connaissances accumulées et de l'infrastructure des sites H+. Les sites H+ servent de plateformes pour accueillir des équipes internationales.
- La structure du réseau permet de mettre en commun les ressources (instruments, savoir-faire, base de données unique), ce qui est particulièrement important pour les études de terrain.
- H+ constitue un bon niveau et une bonne taille pour un réseau de collaboration et offre la possibilité de travailler sur des questions communes, comme l'illustre le nombre de publications générées résultant de collaborations entre partenaires. Il a contribué à structurer une communauté en France impliquant des hydrogéologues, des géophysiciens et des géochimistes.
- Le réseau a prouvé sa capacité à évoluer constamment avec de nouvelles questions scientifiques : de l'impact de l'hétérogénéité sur les processus d'écoulement et de transport à l'intégration avec d'autres disciplines pour répondre à des questions à plus grande échelle.
- Il a activement contribué à la création de nouvelles dynamiques scientifiques, en participant très activement au projet CRITEX et à l'infrastructure OZCAR, avec le réseau RBV, et en construisant le projet ITN ENIGMA avec les principaux partenaires européens développant des recherches en hydrogéophysiques.

Faiblesses :

- Le maintien d'instruments opérationnels, d'une base de données actualisée et d'une dynamique scientifique sur les sites nécessite une forte implication des scientifiques et des techniciens. Néanmoins, dans le contexte actuel, il est difficile, mais essentiel, de recruter ou de renouveler des personnels techniques sur les différents sites pour garantir la continuité des suivis et expérimentations.
- Le soutien financier de l'INSU s'est globalement maintenu au cours des 10 dernières années, mais il n'est pas suffisant pour assurer la jouvence des capteurs et instruments de mesure, ou être en mesure de réaliser de nouveaux investissements sur site, ce qui ne permet pas de garantir la pérennité de tous les sites hautement instrumentés.
- La crise du Covid-19 a également montré une certaine fragilité pour assurer les suivis et expérimentations sur site. La télétransmission est sans doute une solution intéressante, mais qui nécessite des investissements financiers et humains pour être développée à l'échelle des sites.

Opportunités :

- Le recrutement de Camille Bouchez en tant que physicienne adjointe du CNAP va fortement renforcer le réseau et son intégration au sein d'OZCAR, via l'harmonisation des suivis géochimiques au sein du SNO H+ et le développement de nouveaux axes de recherche en biogéochimie.
- Le développement de la base de données hydrogéophysiques H+ au sein d'OZCAR, via le recrutement d'un IE en CDD, doit permettre à l'ensemble des sites d'OZCAR de bénéficier de l'investissement du SNO H+ sur les bases de données du compartiment souterrain.
- La participation active des équipes du SNO H+ au développement de plateformes régionales dans le cadre de l'infrastructure européenne eLTER favorise l'intégration de H+ dans cette infrastructure Européenne et l'émergence de thématiques interdisciplinaires.

Risques :

- Il y a un risque de dispersion des équipes du SNO H+ face à la nécessaire implication dans les différentes structures (SNO, IR OZCAR, eLTER, plateformes régionales...)
- Les ressources humaines et le soutien récurrent sont en tension pour assurer le maintien des tâches d'Observations sur le long terme et l'animation des sites.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DU SERVICE (35 PAGES MAXIMUM)

Les recommandations principales adressées lors de la dernière évaluation du SNO lors de l'état des lieux des services d'observation en 2015 sont données ci-dessous, avec les éléments de réponse principaux que nous y avons apporté durant la période 2015-2021. Le SNO a également organisé une évaluation par son comité scientifique international en 2018 (Composition Andrew Binley, Philippe Renard, Jan Fleckenstein, Jérôme Gaillardet) dont le rapport peut être consulté sur le lien donné en note de bas de page².

- Les arguments pour maintenir ce service sont convaincants car les objets cibles sont très sous-échantillonnés et il faut reconnaître que l'hydrogéologie est très longtemps restée applicative et versée à des intérêts de court terme et pragmatiques. H+ compte parmi les outils qui ont permis à l'hydrogéologie de devenir une discipline scientifique à part entière, complexe et autonome au regard des questions qu'elle se pose. **Réponse : nous avons poursuivi et renforcé cette dynamique au cours de la période 2015-2021, notamment à travers les nombreux développements méthodologiques réalisés au sein de l'Equipex CRITEX ou bien de l'ITN Enigma (voir sections B1 et B12).**
- H+ est un service dynamique qui agrège beaucoup d'activité scientifique, même si la communauté directement intéressée est petite. Revers de cette spécificité, il existe assez peu de services équivalents ailleurs et par conséquent, dans une mise en réseau thématique au-delà de nos frontières, H+ pourrait être esseulé et ne pas avoir le retentissement qui lui permettrait, par exemple, de subsister dans un contexte international. **Réponse : Bien que focalisé sur une thématique ciblée, H+ dispose d'une forte visibilité internationale acquise par le montage de projet européen (ITN Enigma), la coordination de réseaux internationaux et l'organisation d'événements scientifiques (CMWR 2018 ; Ecolé d'été à Cargèse en 2015, 2018 et 2021), voir section B12.**
- H+ est également un service ambitieux servi par de bons résultats scientifiques. Cette ambition est un moteur fondé de sa diversification et de la recherche d'expérimentations et de données novatrices. H+ est néanmoins fragile. Son fonctionnement pourrait être mis en péril par une diminution de ses budgets qui viennent pour beaucoup des instances académiques de la recherche. Le potentiel de diversification des abondements financiers reste faible, simplement parce que H+ stimule une recherche essentiellement fondamentale, dont l'intérêt pour la société civile n'a pas le même retentissement que d'autres actions plus « médiatiques ». La fragilité du service est également le fait d'un personnel restreint et dont une proportion non négligeable, mais à des postes clefs, n'est pas pérennisée sur les postes en question. Un assainissement des diverses structures d'observation donnerait plus de poids aux observations elles-mêmes et aiderait à maintenir pérenne les services qui fonctionnent vraiment. **Réponse : Même s'il est vrai que la situation de certaines équipes reste fragile en termes de ressources humaines et financières, le SNO H+ a su développer des forts partenariats avec des partenaires non-académiques et motiver le recrutement de personnels ITAs et de jeunes chercheurs (MCF, CNRS, CNAP), voir section B12, Annexes 2 et 3.**
- A moyen terme, H+ doit entrer dans des réseaux d'observation plus vastes. L'hydrogéologie seule ne pouvant constituer un réseau de poids, ces structures plus vastes se devraient de décloisonner les thématiques mais garder des attaches scientifiques et disciplinaires fortes en asseyant des partenariats régionaux forts. **Réponse : Durant la période d'évaluation, H+ a développé de nouveaux thèmes de recherche et collaborations en lien avec l'écologie, la géochimie et les aspects sociétaux. H+ s'est également fortement investi dans les réseaux nationaux (OZCAR) et internationaux (ITN ENIGMA, eLTER) et a pris le leadership du projet PIA3 Terra Forma en développant une démarche interdisciplinaire, voir sections B1, B7, B12 et B13.**

² http://hplus.ore.fr/joomla-3.4/files/Rapports%20SOERE/H+%20evaluation%20report_2018.pdf

B1. Contexte, motivations et objectifs scientifiques

Le service d'observation H+ a été créé en 2002 (Figure 1) et est depuis lors continuellement financé par l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS (INSU). **La mission première du service d'observation H+ est de maintenir et de coordonner un réseau de sites expérimentaux** capables de fournir des données pertinentes – y inclus des chroniques ou expériences long terme – pour la caractérisation, la quantification et la modélisation des transferts d'eau, d'éléments et d'énergie dans les aquifères souterrains. Cet outil expérimental a pour objectif d'être reconnu comme un réel outil de recherche fondamentale de niveau international en fédérant et dynamisant les recherches en hydrogéologie au niveau national et, à terme, européen.

Des objectifs scientifiques spécifiques et complémentaires sont définis en fonction des sites instrumentés : l'impact de l'exploitation sur le cycle de l'eau et le rôle des écoulements profonds dans le fonctionnement des écosystèmes (Ploemeur), le couplage entre la matrice poreuse et les structures fortement localisées (fractures ou karsts) (S.E.H. Poitiers), les écoulements dans la zone non saturée et l'alimentation des sources karstiques (LSBB), les relations stock-flux dans les aquifères karstiques (Larzac), les transport de contaminants à l'interface nappe-rivière (Auverwatch), l'impact de la surexploitation des ressources en contexte de mousson (Hyderabad), ...

Le couplage mesures/théories/modèles est une mission fondamentale du service d'observation H+ ; la modélisation, à quel niveau qu'elle soit, est un outil indispensable à la prédiction. L'observatoire a pour vocation de créer un lien pérenne entre les équipes de recherche intéressées par les aspects théoriques, numériques ou expérimentaux des transferts en milieu hétérogène. **Le service d'observation H+ a aussi pour mission d'établir un partenariat entre la recherche fondamentale, la formation et les acteurs opérationnels.** C'est déjà le cas pour l'un des sites (Ploemeur) dont le maître d'œuvre est la communauté de communes Lorient Agglomération. Des actions de formation sont organisées sur l'exploitation de la ressource et la prévention des risques environnementaux.

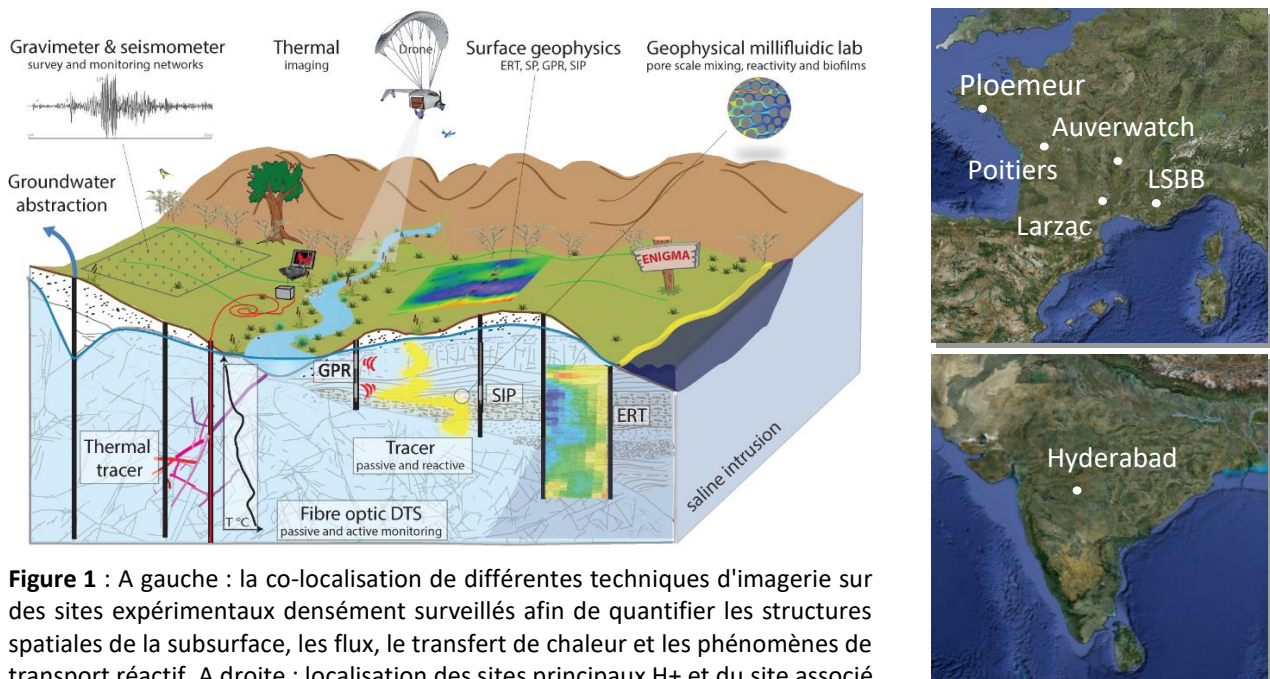


Figure 1 : A gauche : la co-localisation de différentes techniques d'imagerie sur des sites expérimentaux densément surveillés afin de quantifier les structures spatiales de la subsurface, les flux, le transfert de chaleur et les phénomènes de transport réactif. A droite : localisation des sites principaux H+ et du site associé du BRGM en Inde.

Les questions scientifiques principales du réseau H+ sont les suivantes :

- Quel est l'impact de l'hétérogénéité de subsurface dans les milieux poreux et fracturés, y compris l'hétérogénéité transitoire dans la zone non saturée, sur l'écoulement, le transport et les processus biogéochimiques ?
- Quels sont les modèles conceptuels appropriés pour traiter l'hétérogénéité spatiale et l'intermittence temporelle de l'écoulement, des temps de résidence, des propriétés chimiques et des taux de réaction biogéochimique ?

- Comment pouvons-nous faire passer la dynamique des processus à des échelles qui peuvent être gérées par des modèles hydrogéologiques prédictifs ?
- Quelles sont les technologies de terrain adaptées pour explorer et quantifier la distribution spatiale et la dynamique temporelle des processus de subsurface dans les milieux hétérogènes saturés et non saturés ?
- Quel est l'avantage de combiner des approches expérimentales et de surveillance à long terme ?
- Quelles sont les approches de modélisation inverse appropriées pour combler le fossé entre les modèles et les processus de terrain ?
- Quelles sont la couverture spatiale et la fréquence temporelle des mesures nécessaires pour contraindre les modèles ?
- Qu'est-ce qui contrôle l'évolution à long terme de la quantité et de la qualité des eaux souterraines ?
- Quels sont les risques et les opportunités associés aux opérations souterraines en cours et émergentes, telles que l'extraction d'eau et d'énergie, la recharge gérée des aquifères, le stockage des déchets ou l'assainissement des eaux souterraines ?
- Comment les environnements de subsurface répondent-ils et interagissent-ils sous l'effet des forçages climatiques et anthropiques ?

Les nouvelles questions scientifiques ayant émergé ces dernières années, notamment via l'intégration du SNO à l'IR OZCAR, sont les suivantes :

- Quel est le rôle des systèmes souterrains dans le contrôle des cycles hydrologiques et biogéochimiques dans la zone critique ?
- Comment pouvons-nous caractériser et modéliser efficacement la connectivité entre la surface et la subsurface, y compris la recharge à travers la zone non saturée, les échanges entre les rivières et les eaux souterraines, et les remontées d'eau souterraine ?
- Quelles sont les nouvelles opportunités offertes par la combinaison de techniques issues de différentes disciplines (hydrologie, hydromécanique, géophysique, chimie, microbiologie, génétique...) et avec différentes échelles de support ?
- Comment les systèmes de subsurface interagissent-ils avec les écosystèmes aquatiques pour contrôler les processus biogéochimiques et écologiques ?
- Comment l'architecture de subsurface évolue-t-elle en réponse aux processus hydro-mécaniques, tectoniques et d'altération qui créent/impactent les propriétés hydrodynamiques, telles que la porosité ?

Les activités scientifiques développées dans l'observatoire H+ s'organisent autour de trois objectifs scientifiques principaux :

- développer des technologies et des méthodologies innovantes pour l'imagerie des systèmes de subsurface,
- tester, comparer et valider ces nouvelles méthodes dans des sites hautement instrumentés (), où les nouveaux résultats et données sont mis à la disposition par le biais d'une base de données en ligne commune (hplus.ore.fr),
- intégrer les données produits dans des outils de modélisation afin d'améliorer la compréhension des processus et les simulations opérationnelles pour la prédiction des dynamiques hydrogéologiques.

Nécessité des observations sur le long terme

Les observations à long terme des environnements de subsurface, généralement supérieures à dix ans, sont motivées par la large gamme de temps de réponse et de résidence qui caractérisent l'évolution des systèmes hydrogéologiques vis-à-vis des changements environnementaux. Les principaux objectifs de la surveillance à long terme sont i) d'analyser la réponse hydraulique et chimique des aquifères aux perturbations (par exemple les pompages et forçages anthropiques), ii) de quantifier l'impact des changements climatiques ou d'utilisation des terres, et iii) d'obtenir des mesures des flux et du transport

des éléments dans le cycle hydrologique sur des échelles de temps représentatives de ces systèmes. Ces observations à long terme sont complétées par des campagnes expérimentales pour caractériser l'hétérogénéité physique et chimique, cibler les « hot spots » de réactivité biogéochimique, inaccessibles par les observations classiques, et paramétrer les modèles hydrologiques. Une spécificité de H+ est de développer cette approche expérimentale de terrain pour faire avancer le couplage des données et des modèles en utilisant les sites comme un laboratoire expérimental. La base de données est également au centre de cette approche pour accumuler une masse d'informations sur ces objets naturels complexes, et les utiliser dans des modèles prédictifs.

Quelques exemples d'avancées scientifiques obtenues au sein du SNO

Les avancées scientifiques obtenues par l'activité du réseau H+ incluent :

- **Le test des hypothèses de modélisation à partir de données in situ et le problème inverse en hydrogéologie** : la production de données de haute qualité, motivée par des questions de modélisation, est l'un des principaux défis relevés par l'observatoire H+. L'objectif est i) de concevoir des expériences clés pour tester l'hypothèse des modèles et leurs capacités prédictives (Guillaumot et al., en révision), ii) de développer des approches de modélisation inverse appropriées pour des techniques d'imagerie adaptées à la forte hétérogénéité des environnements de subsurface. Cet objectif a été à l'origine de la création de l'observatoire H+ et les équipes de modélisation ont été étroitement associées au développement des sites expérimentaux. Ainsi, les jeux de données de H+ sont utilisés pour tester des modèles à différentes échelles par des équipes au-delà du réseau lui-même. Le benchmark de modélisation (Bodin et al. 2012³) réalisé sur le site de Poitiers et la collaboration avec l'université de Neuchâtel sur les statistiques multipoints (Figure 2, Le Coz et al. 2017⁴) illustrent cette approche. Une collaboration à long terme a été développée avec l'Université de Lausanne pour le développement d'algorithmes d'inversion qui tiennent compte de plusieurs types de données dans un cadre probabiliste pour les milieux fracturés (Dorn et al., 2011, 2012, 2013⁵, Shakas et al. 2016, 2017, 2018⁶). D'autres approches de modélisation sont actuellement développées pour tester l'apport des données de flux pour inverser les propriétés hydrauliques des milieux poreux (Pouladi et al., 2021⁷). La modélisation inverse a également été mise en œuvre à plus grande échelle (site d'Hyderabad) pour obtenir la distribution spatiale (2D et 3D) des paramètres hydrodynamiques dans les roches cristallines hétérogènes (Dewandel et al. 2012, 2017⁸, Mizan et al., 2019⁹).

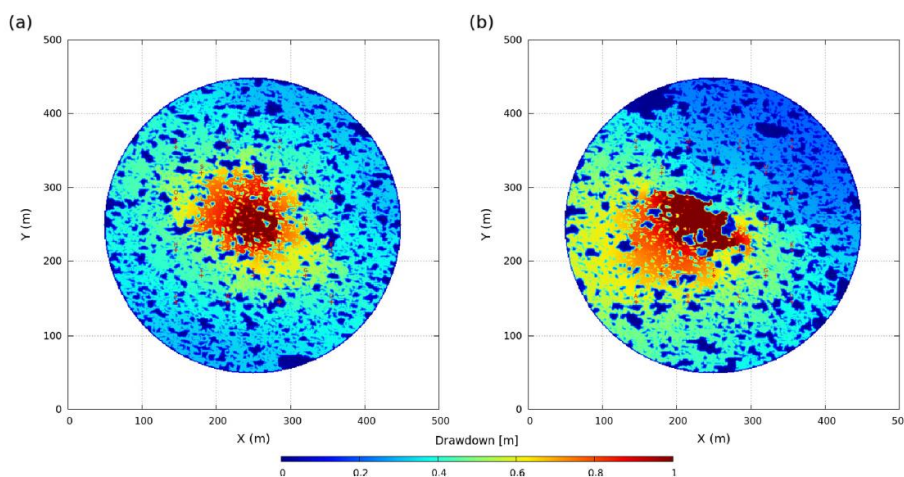


Figure 2 : Exemples de surfaces de rabattement (pour un débit de pompage de 2 102 m³ s⁻¹ au centre du domaine sur une période de 104 s) simulées pour un réseau karstique bien développé (a) et peu développé (b) à proximité du puits de pompage à partir des données du site de Poitiers (Le Coz et al., 2017⁴).

³ Bodin et al. *Journal of Hydrology*, 454-455:82--100, 2012 [DOI](#)

⁴ Le Coz et al. *Journal of Hydrology*, 545:109--119, 2017 [DOI](#)

⁵ Dorn et al. *Geophysical Research Letters*, 38(8), 2011. [DOI](#). Dorn et al. *Journal of Applied Geophysics*, 78:123--132, 2012. [DOI](#) Dorn et al. *Advances in Water Resources*, 62:79--89, 2013. [DOI](#)

⁶ Shakas et al. *Water Resources Research*, 52(2):938--953, 2016. [DOI](#). Shakas et al. *Geophysical Research Letters*, 44(8):3663--3671, 2017. [DOI](#). Shakas et al. *Journal of Hydrology*, 567:305--319, 2018. [DOI](#).

⁷ Pouladi et al. *Journal of Hydrology*, 598:126450, 2021 [DOI](#)

⁸ Dewandel et al. *Journal of Hydrology*, 416-417:83--97, 2012. [DOI](#). Dewandel et al. *Journal of hydrology*, 550, 118-129, 2017. [DOI](#)

⁹ Mizan et al. *Hydrogeology Journal*, 27(8):3063--3080, 2019. [DOI](#)

- **La caractérisation des processus de transport et des transformations biogéochimiques dans la subsurface et à travers les interfaces avec d'autres compartiments.** L'utilisation combinée de différents traceurs artificiels et environnementaux, y compris des traceurs thermiques ou réactifs, est une approche prometteuse pour réduire l'incertitude de la caractérisation des processus de transport et des modèles conceptuels (Read et al. 2013¹⁰, Bense et al. 2016¹¹, Klepikova et al. 2014, 2016¹², Roques et al. 2014, 2017¹³, 2018¹⁴, de la Bernardie et al., 2018¹⁵, Hoffman et al., 2020¹⁶). Les données d'essais de traceurs contrôlés, obtenues sur les sites de roches fracturées de Ploemeur et d'Hyderabad, ont été utilisées pour tester et valider le modèle de transport non fickien récemment développé, notamment le modèle CTRW (Kang et al., 2015¹⁷, collaboration avec le MIT) et le modèle stochastique de tube de courant (Guiheneuf et al. 2017¹⁸, collaboration avec l'université de Californie à Long Beach). Les mesures de gaz dissous (Chatton et al., 2017¹⁹, Hoffman et al., 2020¹⁶) et de CFC ont été utilisées pour contraindre les processus de transport souterrain. Les données de CFC et d'âge de l'eau ont aussi été inversées pour déduire la distribution du temps de résidence des eaux souterraines, ce qui a permis de réduire considérablement l'incertitude pour la calibration des modèles d'eaux souterraines (Leray et al. 2012, 2014²⁰, Massoudieh et al., 2014²¹, Marçais et al. 2015²²). Des campagnes de terrain ont été menées sur les sites H+ pour étudier les interactions fluide-solide (par exemple, l'analyse de la dissolution du sélénium sur le site de Poitiers), le rôle des micro-organismes dans le transport réactif (par exemple, la dénitrification sur le site de Ploemeur), l'influence des processus de mélange sur les réactions biogéochimiques à l'interface eau de rivière / eau souterraine (site d'Auverwatch, Mohammed et al., 2014²³). Enfin, les équipes de H+ ont récemment commencé à étudier la structure et les fonctions des communautés microbiennes profondes (séquençage d'ARN et d'ADN, analyse métagénomique) en relation avec le temps de résidence des eaux souterraines, en collaboration avec le laboratoire Ecobio (**Figure 3**, Ben Maamar et al., 2015²⁴, Bochet et al., 2020²⁵, Bethencourt et al., 2020²⁶).

- **Quantification des flux de recharge dans des milieux hétérogènes :** Les systèmes interagissent avec les environnements de surface sur une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. La recharge fait l'objet d'une grande attention, principalement pour ses conséquences sur la gestion de l'eau. Les principaux défis sont de quantifier les échanges verticaux à des échelles pertinentes et de tenir compte des voies préférentielles dans les milieux hétérogènes. L'approche développée par les équipes de H+ est double : (1) utiliser des outils intégratifs pour définir les taux de recharge et les chemins à travers la zone non saturée et (2) quantifier son impact sur les systèmes d'eau souterraine. De nouvelles méthodes expérimentales combinant des mesures directes de flux et l'imagerie géophysique ont été testées sur les sites H+ pour caractériser la variabilité spatiale, la dépendance à l'échelle et la dynamique temporelle des flux de recharge. Les développements innovants comprennent : le suivi de la dynamique de la recharge à partir de mesures répétées de la gravité absolue (Jacob et al., 2009, 2010²⁷, Mazzilli et al., 2013²⁸; Fores et al., 2017²⁹, Mouyen et al., 2019³⁰), les mesures gravimétriques surface/profondeur en time-lapse (Champollion et al.,

¹⁰ Read et al. *Geophysical Research Letters*, 40(10):2055--2059, 2013. [DOI](#)

¹¹ Bense et al. *Water Resources Research*, 52(12):9259--9273, 2016 [DOI](#)

¹² Klepikova et al. *Journal of Hydrology*, 512:549--562, 2014 [DOI](#). Klepikova et al. *Water Resources Research*, 52(7):5442--5457, 2016 [DOI](#)

¹³ Roques et al. *Journal of Hydrology*, 509, 42-54, 2014 [DOI](#). Roques et al. *Advances in water resources*, 108, 29-43, 2017 [DOI](#).

¹⁴ Roques et al. *Science of The Total Environment*, 619-620:491--503, 2018 [DOI](#)

¹⁵ De La Bernardie et al. *Water Resources Research*, 54(12):10,053--10,075, 2018. [DOI](#)

¹⁶ Hoffmann et al. *Geophysical Research Letters*, 47(17), 2020 [DOI](#)

¹⁷ Kang et al. *Water Resources Research*, 51(2):940--959, 2015. [DOI](#)

¹⁸ Guihèneuf et al. *Journal of Contaminant Hydrology*, 206:18--33, 2017. [DOI](#)

¹⁹ Chatton et al. *Environmental Science & Technology*, 51(2):846--854, 2017 [DOI](#)

²⁰ Leray et al. *Journal of Hydrology*, 464-465:54--68, 2012. [DOI](#). Leray et al. *of Hydrology*, 511:555--566, 2014. [DOI](#)

²¹ Massoudieh et al. *Applied Geochemistry*, 50:240--251, 2014. [DOI](#)

²² Marçais et al. *Journal of Hydrology*, 525:619--631, 2015. [DOI](#)

²³ Mohammed et al. *Journal of Hydrology*, 508:181--196, 2014. [DOI](#)

²⁴ Ben Maamar et al. *Frontiers in Microbiology*, 6:1457, 2015. [DOI](#)

²⁵ Bochet et al. *Nature Geoscience*, 13:149--155, 2020. [DOI](#)

²⁶ Bethencourt et al. *FEMS Microbiology Ecology*, 96(5), 03 2020. [DOI](#)

²⁷ Jacob et al. *Geophysical Journal International*, 177(2):347--360, 2009. [DOI](#). Jacob, et al. *Journal of Geophysical Research*, 115(B6), 2010. [DOI](#)

²⁸ Mazzilli et al. *Environmental Earth Sciences*, 68:1631--1646, 2013. [DOI](#)

²⁹ Fores et al. *Journal of Geodesy*, 91:269--277, 2017. [DOI](#)

³⁰ Mouyen et al. In *E3S Web of Conferences*, volume 88. i-DUST 2018, 2019. [DOI](#)

2018³¹), l'imagerie géophysique des hétérogénéités (Mazzili et al., 2016³²; Carriere et al., 2017³³, Blazevic et al., 2020³⁴), et le suivi à long terme des niveaux d'eau et des données hydrochimiques (Jimenez-Martinez et al., 2013³⁵; Roques et al. 2018¹⁴). Parallèlement à cet effort de quantification du rôle de l'hétérogénéité sur la dynamique de recharge, certaines études ont analysé comment les hétérogénéités à l'échelle du réservoir contrôlent le fonctionnement hydrologique du réservoir (Roques et al., 2014³⁶; Guihéneuf et al., 2014³⁷, Nicolas et al., 2019³⁸), notamment à travers le suivi de bassins d'infiltration utilisés pour la recharge gérée des aquifères en Inde (Alazard et al. 2016³⁹).

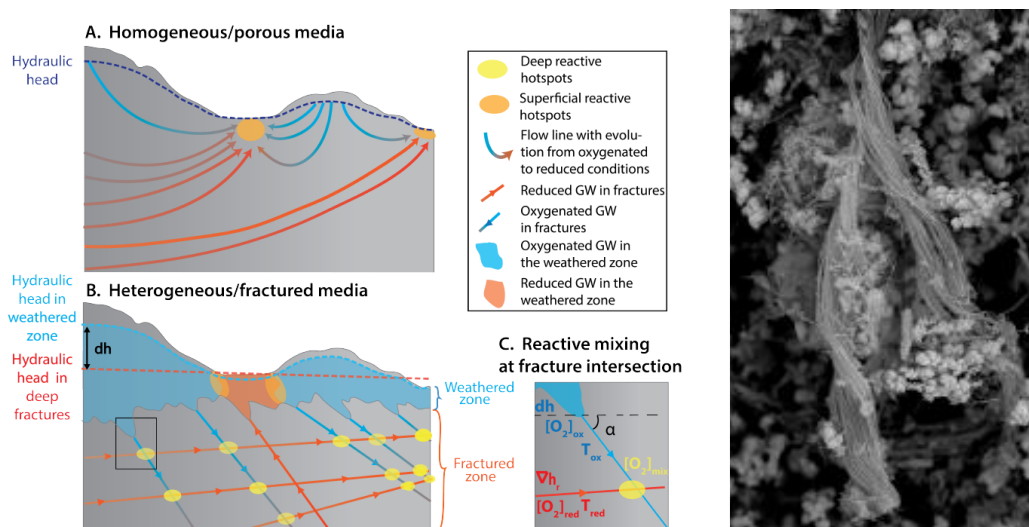


Figure 3 : A. Représentation commune des chemins d'écoulement dans une subsurface homogène. Au fur et à mesure que l'eau s'écoule le long des voies d'écoulement, la séquence d'oxydoréduction évolue d'un état oxydant (bleu) à un état réducteur (rouge). Les chemins d'écoulement transportant de l'eau à différents états redox ne se croisent qu'à la sortie, créant des hot spots réactifs localisés à l'interface entre les environnements aquatiques et terrestres (McClain et al. 2003⁴⁰). B. Modèle conceptuel pour la formation de hot spots réactifs profonds dans les milieux fracturés. Les écoulements sont principalement localisés dans les zones de fracture. Dans les zones de recharge, l'eau riche en oxygène s'écoule à travers la zone altérée jusqu'aux fractures profondes. Dans les zones de décharge, les eaux souterraines profondes s'écoulent des fractures vers la zone altérée pour alimenter les rivières. Les hot spots de mélange se développent aux intersections entre les fractures oxydées et les fractures réduites, entretenant ainsi une série de processus microbiens profonds. C. Zoom sur l'intersection des fractures oxydées et réduites. D. Observations au microscope électronique à balayage du tapis microbien : Tiges torsadées caractéristiques de certaines souches de *Gallionella* et *Ferrphaselus* (d'après Bochet et al. 2020²⁵).

B2. Mission d'observation

Le réseau H+ était initialement composé de quatre sites (Ploemeur, Poitiers, Cadarache et Majorque). Depuis 2008, le site du Larzac a intégré officiellement le service d'observation H+ et un site (Cadarache) a quitté le réseau. En outre, deux sites (LSBB et Hyderabad) ont été associés au service H+ par le biais du programme SOERE, de 2012 à 2017. En 2017, trois projets SOERE ont fusionné pour créer l'infrastructure de recherche nationale OZCAR⁴¹, qui offre une vision globale de la "zone critique". Enfin, en 2017, un nouveau site dédié aux interactions entre les rivières et les eaux souterraines (Auverwatch) et l'équipe de

³¹ Champollion et al. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(7):3825--3839, 2018. [DOI](#)

³² Mazzili et al. *Geophysics*, 81(4):WB49--WB61, 2016. [DOI](#)

³³ Carrière et al. *Geophysics*, 82(5):EN93--EN98, 2017. [DOI](#)

³⁴ Blazevic et al. *Water*, 12(5), 2020. [DOI](#)

³⁵ Jiménez-Martínez. *Water Resources Research*, 49(5):3007--3023, 2013. [DOI](#)

³⁶ Roques et al. *Journal of Hydrology*, 509, 42-54, 2014. [DOI](#)

³⁷ Guihéneuf et al. *Journal of Hydrology*, 511:320--334, 2014. [DOI](#)

³⁸ Nicolas et al. *Journal of Hydrology*, 573:717--732, 2019. [DOI](#)

³⁹ Alazard et al. *Hydrogeology Journal*, 24(1):35--57, 2016. [DOI](#)

⁴⁰ McClain et al. *Ecosystems*, 301-312. [JSTOR](#)

⁴¹ <https://www.ozcar-ri.org>

géophysique METIS ont demandé à intégrer le réseau et ont reçu une évaluation positive du conseil de direction de H+. Les principales caractéristiques de chaque composante sont détaillées dans l'annexe 1.

Des objectifs scientifiques complémentaires sont définis sur les différents sites instrumentés (annexe 1) : l'impact des prélèvements d'eau souterraine sur le cycle de l'eau en milieu fracturé (Ploemeur et Hyderabad), les transferts couplés dans des chemins d'écoulement très localisés et une matrice poreuse (Poitiers), les voies de recharge et la répartition du stockage dans les systèmes karstifiés (Larzac), l'étude et l'imagerie des processus d'écoulement et de transport intermittents dans la zone non saturée (tunnel LSBB), l'étude du transport et de la réaction de contaminants émergents dans des systèmes rivière-eau souterraine en interaction (Auverwatch). Les principaux types de paramètres actuellement disponibles et mesurés sur les sites H+ (230 paramètres au total) sont présentés dans le tableau 1.

Fréquence	Paramètres	Sites de H+
Année, semestre	Hydrochimie, temps de résidence, profils de température des forages	Ploemeur, Larzac, Hyderabad, Auverwatch
Mois	Hydrochimie de la zone non saturée	Ploemeur, LSBB, Poitiers, Auverwatch
Jour	Résistivité électrique	Larzac
Heure	Données météorologiques, mesure ponctuelle de la température et de la conductivité électrique	Larzac, Poitiers, Ploemeur, Hyderabad, Auverwatch
Minute	Niveaux piézométriques, GPS, suivi de la zone non saturée (contenu d'eau, pression, température)	Larzac, Poitiers, Ploemeur, Hyderabad
Seconde	Gravimètre absolu, inclinomètres de haute précision, tour de flux, GPS	Larzac, Ploemeur, LSBB
Milliseconde	Sismomètre	Ploemeur
Campagnes expérimentales	Géophysique de forage (sonde multi-paramètres, gamma-ray, logs optiques, résistivité, PS, débitmètre) et géophysique de surface (électrique, électromagnétique, sismique). Tests de pompage, mesures de débit, fibre optique DTS, tests de traçage, « time-lapse » hydrogéophysique	Ploemeur, Poitiers, Larzac, LSBB, Auverwatch, sites OZCAR (Houay Pano, Strengbach, Auradé, ObsERA, Draix-Bléone)

Tableau 1 : Principaux types de paramètres mesurés sur les sites H+ .

Le SNO a-t-il effectué ou accompagné des innovations et/ou développements techniques majeurs ?

Les équipes de H+ sont fortement impliquées dans le développement de méthodes d'expérimentation de l'innovation, notamment à travers le projet Equipex CRITEX (2012-2019 <https://www.critex.fr/>). Les équipes H+ étaient notamment responsables des work packages suivants : WP2 Hydrogéodésie, WP3 surveillance spatialement distribuée de la température avec fibre optique DTS, WP 6.1 méthodes sismiques, WP7.1 équipement de puits, WP7.2 surveillance de puits, WP 7.3 expériences de test de traceur réactif, WP 8.1 traçage de gaz. Quelques exemples de développements expérimentaux innovants réalisés au cours des dernières années dans le réseau H+ sont donnés ci-dessous.

- **DTS par fibre optique** : Depuis 2006, le développement de la détection distribuée de la température par fibre optique a donné lieu à de nouvelles opportunités pour des mesures directes et spatialement distribuées de la température en hydrologie (Selker et al., 2006). Ceci a conduit à de nombreuses applications en hydrologie, notamment pour caractériser les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface, mais aussi pour détecter des flux ou estimer la teneur en eau dans la zone non saturée. Le réseau H+ a été un des premiers initiateurs de l'utilisation des mesures de températures distribuées par fibre optique en hydrogéologie pour étudier l'écoulement des eaux souterraines et détecter les principales fractures contributive (Read et al., 2013⁴²; 2014⁴³; 2015 ; Bense et al., 2016¹¹). Les outils et méthodes se sont avérés également très utiles pour caractériser le transport thermique en milieu fracturé (de la Bernardie et al., 2018 ; 2019). Toutes ces méthodes et outils ont également été appliqués pour montrer comment la dynamique des eaux souterraines dans un aquifère karstique (site de Poitiers) peut être

⁴² Read et al. *Geophysical Research Letters*, 40(10):2055--2059, 2013. [DOI](#)

⁴³ Read et al. *Water Resources Research*, 50(5):3706--3713, 2014. [DOI](#)

caractérisée par des méthodes actives et passives de DTS par fibre optique (**Figure 4**) (Le Lay et al., en préparation). Par ailleurs, nous avons développé une nouvelle méthode pour obtenir une mesure spatialement distribuées des écoulements en milieux poreux (Simon et al., 2021⁴⁴) dont le principe est décrit figure 6 (Pouladi et al., 2021⁴⁵). Le principe est basé sur l'anémométrie fil chaud et consiste à faire chauffer un câble de fibre optique en faisant circuler un courant électrique le long du câble précédemment enfoui dans le milieu poreux. L'élévation de température est à la fois fonction de la puissance du courant injecté, mais aussi des propriétés thermiques du milieu poreux et de l'écoulement de fluide. Grâce aux développements effectués (Simon et al., 2021), il est ainsi possible de mesurer les flux d'écoulement en milieu poreux avec une grande précision sur une large gamme de mesure. Ces développements sont actuellement appliqués pour caractériser les flux aux interfaces entre les systèmes hydrologiques de surface et de subsurface (Simon et al., soumis).

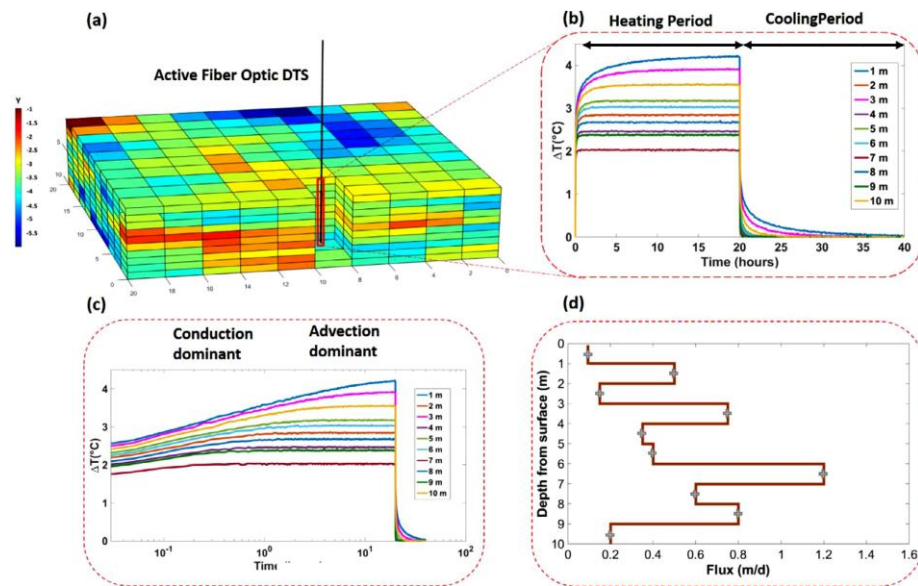


Figure 4 : Principe de la mesure des flux par méthode active DTS (Pouladi et al., 2021 ; Simon et al., 2021). a) enfouissement de la fibre au sein d'un milieu poreux. Augmentation de température mesurée à différents endroits le long du câble en diagramme linéaire (b) et semi-logarithmique (c). (d) Mesure de flux en fonction de la profondeur déduites de l'interprétation des courbes de température.

- **Laboratoire mobile et gaz dissous** : Afin de quantifier les processus de mélange et de transport réactif dans les systèmes naturels, y compris les bassins versants, les rivières, les zones hyporhéiques et les environnements de subsurface, l'Université de Rennes et le CNRS ont développé un laboratoire mobile (**Figure 5**, CRITEX WP 7.3) conçu pour accueillir une suite d'instruments d'analyse chimique à haute fréquence permettant un suivi continu de l'évolution des espèces chimiques dissoutes et des gaz dissous lors des expériences de transport réactif. Les instruments embarqués comprennent un spectromètre de masse in situ (MIMS), une chromatographie en phase gazeuse pour les mesures de gaz dissous (Chatton et al., 2017⁴⁶) et des mesures de flux en continu pour mesurer les concentrations de silicates, phosphates, fer, ammonium, nitrates et nitrites dissous à une fréquence de 40 mesures par heure. Les expériences de traceurs sont réalisées à la fois en rivière et dans le sous-sol. Des injections contrôlées dans le sous-sol sont réalisées à l'aide d'un double packer gonflable entièrement équipé de capteurs multi-paramètres (Chatton et al., 2017⁴⁹; Hoffman et al., 2020¹⁶). Les expériences de subsurface sont réalisées sur les sites H+ et ENIGMA. Les expériences en rivière et dans la zone hyporhéique sont réalisées dans les bassins versants instrumentés de l'IR OZCAR, en particulier ceux récemment équipés de laboratoires de rivière3, qui surveillent en permanence les concentrations chimiques à haute fréquence (Floury et al., 2017⁴⁷). Les expériences de test de traceurs sont conçues pour répondre aux questions actuellement ouvertes sur les

⁴⁴ Simon, N. et al., *Water Resources Research*, 57, 2021. [DOI](#)

⁴⁵ Pouladi et al. *Journal of Hydrology*, 598:126450, 2021. [DOI](#)

⁴⁶ Chatton et al. *Environmental Science & Technology*, 51(2):846--854, 2017. [DOI](#)

⁴⁷ Floury et al. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6153-6165, 2017. [DOI](#)

processus de transport réactif dans les systèmes hydrologiques, y compris les bassins versants, les rivières, les zones hyporhéiques et les environnements de subsurface. Une gamme de réactions biogéochimiques est étudiée, y compris les réactions redox, telles que la dénitrification et l'oxydation du fer, éventuellement couplées à des processus microbiologiques. L'objectif est : i) d'évaluer l'impact des débits et des processus de mélange sur les taux de réaction, ii) de quantifier le lien entre les temps de résidence et les taux de réaction, et iii) de quantifier l'effet des processus réactifs de subsurface sur la chimie des rivières.



Figure 5 : Laboratoire mobile sur le site de Plomeur (à gauche) pour mesurer les propriétés hydrochimiques et microbiologiques dans des fractures à différentes profondeurs isolées par un obturateur (à droite). (Bochet et al. 2020²⁵)

- **Gravimètres absolus** : Initié par une initiative française d'excellence RESIF-Core et la société française Muquans (www.muquans.com) il y a dix ans, le développement d'un nouveau gravimètre absolu (AQG) est maintenant en phase finale de validation. L'AQG estime les valeurs de gravité à partir d'atomes en chute libre. Le principal avantage est un gravimètre absolu plus robuste (pas de pièce mobile) et plus compact avec des capacités de mesures continues. En hydrogéologie, un tel capteur de gravité pourrait être utilisé pour la cartographie temporelle de la teneur en eau dans des hydro-systèmes hétérogènes ou comme piézomètre virtuel lors de tests de pompage. La phase de validation de l'AQG a été effectuée dans le cadre d'un thèse du projet ITN ENIGMA en collaboration entre Muquans et l'équipe du Larzac de l'université de Montpellier (laboratoire Géosciences Montpellier) (Cooke et al., 2021⁴⁸).

- **Inclinomètres** : L'inclinaison est le gradient horizontal local de la déformation verticale, qui peut être mesurée très précisément (jusqu'à 10^{-9} radians) avec des instruments "simples" mais très stables (pendule horizontal de Blum, inclinomètre à tube rempli d'eau). Ces instruments sont rarement utilisés en géodésie en raison de leur sensibilité à la redistribution de l'eau (appelée "processus locaux"). En effet, la sensibilité de ces instruments directionnels s'échelonne avec l'inverse du carré de la distance, ce qui les rend aptes à investiguer des échelles allant de 1-m à 1-km. Ils sont ainsi parfaitement adaptés aux études hydrogéologiques, notamment en milieu hétérogène. L'utilité des mesures inclinométriques a été mise en évidence pour plusieurs applications : 1) définir les structures perméables actives et leurs propriétés à partir d'observations de surface. Intuitivement, l'inclinaison est sensible au déséquilibre de pression entre chaque côté de l'axe de rotation, qui est négligeable pour les milieux homogènes, alors qu'il est important dans les milieux hétérogènes. Récemment, les propriétés hydromécaniques de fractures de 80 m de profondeur ont été estimées à partir de inclinomètre de surface lors d'un test sinusoïdal (Schuite et al., 2015⁴⁹, 2017a⁵⁰). 2) Imagerie de la structure d'écoulement des eaux souterraines. Si la déformation verticale est liée à la hauteur de la nappe, le gradient latéral de la déformation est fortement lié à l'écoulement tel que défini par la loi de Darcy. Une très forte corrélation entre le débit des sources karstiques et l'inclinaison observée à 15 km a été mise en évidence sur le site du LSBB (**Figure 6**, Lesparre et al., 2017⁵¹). Intuitivement, l'inclinaison fournit également une information sur les flux d'eau de masse, moyennés sur son domaine de sensibilité.

⁴⁸ Cooke, et al., *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 10, 65–79, <https://doi.org/10.5194/gi-10-65-2021>, 2021.

⁴⁹ Schuite et al. *Geophysical Research Letters*, 42(24):10,696–10,703, 2015. [DOI](https://doi.org/10.1029/2015GL066666).

⁵⁰ Schuite et al. *Water Resources Research*, 53(12):10558–10582, 2017. [DOI](https://doi.org/10.1029/2017WR021444)

⁵¹ Lesparre et al. *Geophysical Journal International*, 208(3), 1389–1402, 2017. [DOI](https://doi.org/10.1093/gjg/gjw284)

Schuite et al., 2017 ont également mis en évidence la structure des flux lors d'un test de pompage à partir de l'analyse du rapport entre l'inclinaison et les variations de pression. En effet, la déformation est beaucoup plus efficace lorsque le changement de pression est focalisé dans une fracture, par rapport aux échanges matrice-fracture. Ils ont isolé 2 régimes d'écoulement différents et leur transition (écoulement 1D dans les fractures puis échanges 2D matrice/fracture) en se basant sur l'interprétation conjointe des données de déformation d'inclinaison et de hauteur d'eau souterraine. Cette approche a été validée par un modèle poroélastique développé sur ABACUS (Schuite et al., 2017b⁵²).

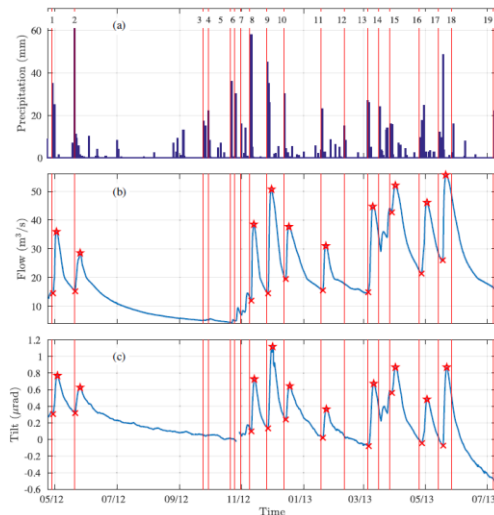


Figure 6 : (a) Données de pluviométrie en mm d-1. (b) Débit à la sortie de la FdV. (c) Inclinaisons mesurées le long de la direction 350°N avec la base longue d'environ 150 m (site LSBB). Une augmentation de l'inclinaison indique que le bloc sud se soulève. Les lignes rouges indiquent les événements pluvieux avec des précipitations supérieures à 15 mm. Les variations d'inclinaison supérieures à 0,3 µrad sont marquées par des étoiles rouges. Les croix rouges indiquent le début du flux et l'augmentation de l'inclinaison sur les tracés (b) et (c), respectivement (Lesparre et al. 2017⁵¹)

Préciser si le SNO a vocation à conduire des activités d'enseignement et de formation (académique ou continue).

Oui l'accueil des étudiants sur ses infrastructures est l'une des vocations centrales du réseau (section B6).

B3. Protocoles de mesure

Le réseau H+ produit des données de différentes natures, notamment des données hydrologiques (par ex. les niveaux piézométriques, le débit de rivières, les tests hydrauliques), des données chimiques (par ex. les concentrations de composés naturels et introduits et les quantités dérivées telles que l'âge de l'eau souterraine), des données géophysiques (par ex. l'imagerie acoustique, ERT, RMP, les coupes sismiques, la gravimétrie), données hydromécaniques (inclinomètre), des données catégorielles (par ex. la description des logs géologiques), des données de certaines expériences spécifiques (par ex. de fibre optique pendant le test de pompage, de tests de traçage). Ainsi des protocoles de mesure spécifiques sont définis pour chacune de ces données. Fondamentalement, les objectifs de la stratégie de gestion de la qualité des données de H+ que nous souhaitons garantir sont que:

- la précision et la fiabilité des mesures grâce à l'utilisation d'équipements régulièrement calibrés avec des normes de référence
- les mesures effectuées à des moments différents sont comparables
- les sources d'incertitude sont identifiées et quantifiées
- les nouveaux types de données sont intégrés au fur et à mesure du développement de nouvelles technologies de détection et d'analyse.

Ainsi, l'observatoire H+ organise des exercices d'intercomparaison internationaux pour valider de nouvelles techniques de mesure ou des approches de modélisation inverse. H+ a notamment accueilli en 2012 le premier exercice international d'intercomparaison des techniques de datation des eaux souterraines (GDAT) coordonné par des scientifiques de H+. Les résultats ont été publiés dans le numéro spécial du journal of applied geochemistry " Dissolved gases in groundwater and groundwater dating methods "

⁵² Schuite et al. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(8):6046–6066, 2017 [DOI](#)

(Labasque et al., 2014a, 2014b⁵³). En parallèle, des études de modélisation ont été réalisées afin d'évaluer le contenu informatif sur les données d'âge des eaux souterraines pour calibrer les modèles hydrogéologiques (Massoudieh et al., 2014⁵⁴, Leray et al., 2012, 2014²⁰).

Le réseau H+ contribue également à fournir de nouvelles données, dont il faut définir les incertitudes, comme des données de gravimétrie ou d'inclinométrie (Lesparre et al., 2017⁵¹) ou des données d'écoulement distribué ou de flux dans les milieux poreux (Simon et al., 2021). Pour chaque nouveau type de données, des analyses d'incertitudes sont menées pour évaluer les limites de la méthode (voir par ex : Simon et al., 2021). Depuis plusieurs années, des bancs de calibration ont aussi été mis en place, notamment à l'Université de Rennes pour évaluer les incertitudes de mesure des capteurs de pression ou température. Des discussions sont également en cours avec l'Université de Rouen pour intégrer un nouveau site hautement instrumenté au sein du réseau H+ (voir partie B13 prospective). L'Université de Rouen à travers son implication dans la plateforme PRESEN a mis en place depuis plusieurs années une démarche qualité, y compris autour des mesures in-situ, sur laquelle il sera intéressant d'essayer de s'appuyer dans les années qui viennent.

B4. Archivage des données et leur mise à disposition

Description précise des données disponibles :

La base de données H+ a été créée pour l'insertion de l'ensemble des données hydro-géophysiques collectées par l'observatoire H+ (tableau 1). Elle est un outil essentiel pour les échanges scientifiques au sein et à l'extérieur du réseau. Elle constitue une base de données unique au niveau international pour le stockage et la dissémination de données et de métadonnées en hydrogéophysique. A travers l'infrastructure OZCAR et le réseau Européen ITN ENIGMA, la base H+ a été ouverte pour l'archivage de données hydrogéophysiques d'autres observatoires Français et Internationaux. Actuellement, la base de données H+ contient les données de 20 sites nationaux et européens. Pour cela, elle bénéficie de l'excellent travail d'une ingénieure d'étude en CDD pour l'infrastructure OZCAR (actuellement Meruyert Kenshlikova) qui fait le lien entre le développement de la base et les fournisseurs de données hydrogéophysique sur l'ensemble des sites OZCAR. Le nombre moyen de valeurs de données saisies chaque année est de 50 millions. Il y a actuellement plus de 280 utilisateurs enregistrés dans la base de données, qui font en moyenne 200 requêtes chaque année.

Statut juridique :

Les données de la base H+ sont placées sous la licence CC BY-NC-SA International 4.0. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>. Cette licence couvre les droits des producteurs de données et stipule les conditions suivantes :

- Attribution - Chaque utilisateur doit citer le crédit approprié, fournir un lien vers la licence et indiquer si des modifications ont été apportées. Il peut le faire par tout moyen raisonnable, mais sans toutefois suggérer que le donneur de licence soutient l'utilisation.
- Non commercial - Le matériel ne peut être utilisé à des fins commerciales.
- ShareAlike - Toute contribution au matériel doit être distribuée sous la même licence que l'originale.
- Pas de restrictions supplémentaires - Les termes légaux ou les mesures technologiques qui empêchent légalement les autres de faire tout ce que la licence autorise ne peuvent être appliqués.

Des modes et droits d'accès :

Pour extraire des données de la base de données H+, l'utilisateur a besoin d'un login et d'un mot de passe, fournis sur demande sur la page du site web : <http://hplus.ore.fr/base-de-donnees-fr/connexion>⁵⁵. Lorsque les données sont insérées dans la base de données, elles sont considérées comme disponibles sans

⁵³ Labasque et al. *Applied Geochemistry*, 40:119--125, 2014. [DOI](#). Labasque et al. *Applied Geochemistry*, 50:118--129, 2014. [DOI](#)

⁵⁴ Massoudieh et al. *Applied Geochemistry*, 50:240--251, 2014. [DOI](#)

restriction. Toutes les données sont disponibles sur le site web de H+ dans la section "Data/Base de données" (<http://hplus.ore.fr/en/database>⁵⁵).

L'amélioration continue de l'interface d'extraction de la base de données en ligne est importante afin de garantir un accès efficace aux nouveaux utilisateurs (voir le site web <http://hplus.ore.fr/acces-database>⁵⁵ login *db-visitor* ; mdp *Workdb0407*). Des progrès significatifs ont été réalisés dans ce sens et les données H+ peuvent actuellement être extraites de trois manières différentes :

- i) en formulant des requêtes dans l'interface avancée,
- ii) en consultant des requêtes prédéfinies qui permettent un téléchargement direct des principaux ensembles de données pour chaque site,
- iii) par l'interface Google Earth (exemple pour le site de Ploemeur <http://hplus.ore.fr/documents/ploemeur.kmz>⁵⁵) qui permet une visualisation spatiale des sites et des emplacements de mesures (**Figure 7**), ainsi que le téléchargement direct des données brutes et des fichiers de description des mesures géophysiques. Il y a en moyenne 100 téléchargements par an effectués via cette interface.



Figure 7 : Illustration de l'intégration de plusieurs sites H+ dans la base de données à travers leur interface Google Earth. A gauche : emplacement des stations de mesures de débit dans le tunnel du LSBB, au milieu : forages instrumentés sur le site d'Hyderabad, à droite : forages instrumentés et coupes sismiques sur le site de Ploemeur.

Il existe une version publique de certains jeux de données, dans le cas où le fournisseur choisit de les rendre publics sans restriction d'accès. De la même façon, les modules google earth existent pour chaque site en version publique, seules les métadonnées des jeux de données sont accessibles, certaines localisations de points de mesure peuvent être aussi floutés si le responsable de site le souhaite ([exemple 1](#), [exemple 2](#)).

Intégration dans des bases de données nationales et internationales éventuelles :

Au niveau base de données, les interactions entre H+ et OZCAR se font dans les deux sens. Les données H+ sont transmises à la base de données THEIA. Le Système d'Information des données *in situ* du pôle Theia a été conçu pour collecter les données d'observation de la surface continentale provenant de différents observatoires (portal web <https://in-situ.theia-land.fr/>). Les mesures chimiques de H+ sont déjà disponibles sur ce portail web (**Figure 8**) et d'autres jeux de données sont en cours de préparation. Par ailleurs, les données hydro-géophysiques des sites OZCAR sont insérées dans la base de données H+. Ainsi, les mesures de tomographie par résistivité électrique et les données sismiques des sites de [Houay Pano](#), [OHGE-Strengbach](#), [Auradé](#), [ObsERA](#), [Draix-Bléone](#)⁵⁵ sont déjà disponibles dans la base de données H+.

Les données H+ sont également en cours de transfert dans l'infrastructure de données géographiques OSURIS, l'outil de l'OSUR pour la visualisation et la mise à disposition de données géographiquement référençables. Certaines métadonnées ont déjà été insérées dans l'application GeoNetwork d'OSURIS, une application web de catalogage de l'information géographique⁵⁶, ce qui en permettra le moissonnage à travers d'autres IDS (notamment celui d'OZCAR actuellement en cours de construction). Les autres fichiers de métadonnées sont en cours de préparation pour une insertion ultérieure dans l'application GeoNetwork.

⁵⁵ Login et mot de passe mis à disposition pour les relecteurs du dossier d'évaluation qui souhaiteraient accéder à la base de données : login *db-visitor* ; mdp *Workdb0407*

⁵⁶ <https://www.osuris.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/search>

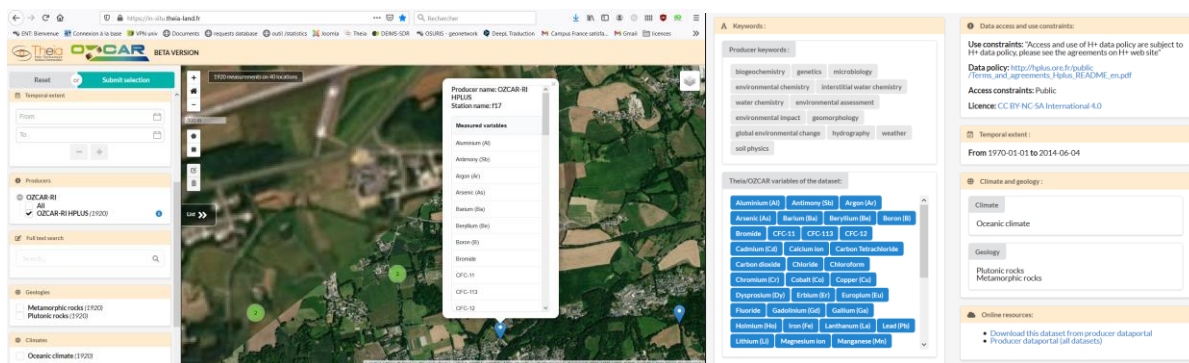


Figure 8 : Visualisation des variables mesurées chimiques H+ dans Theia-OZCAR

Métadonnées, étapes de prétraitement et traçabilité :

H+ est une base de données relationnelle, qui repose sur le langage SQL (Structured Query Language) et est organisée en fonction des métadonnées et des informations contenues dans les modèles de fichiers. Les métadonnées de la base de données sont communes à tous les sites et sont donc mises à jour en permanence. Pour le moment, les métadonnées comprennent la liste des différents sites, les aquifères, les types d'expériences, les paramètres mesurés et leurs catégories, les types de données spatialisées, les unités, les outils de mesure et leurs types, les matériaux de tubage et les types de plateformes et d'expériences. Au préalable de l'insertion des données dans la base de données, celles-ci peuvent subir un pré-traitement dont le producteur a la charge. En effet, cette étape peut consister en la suppression de valeurs aberrantes liées à des dysfonctionnements ou la nécessité de recalibrer les appareils de mesure. C'est à la responsabilité du producteur du données. Ainsi, la base ne contient que des mesures brutes ou interprétées qui ont été validées.

Pour faciliter l'insertion des données dans la base de données H+, des modèles de fichiers ont été créés. Ils comprennent une description des conditions de mesure et du contexte (humain, matériel, méthodologique, environnemental). Différents formats de modèles sont disponibles (csv, xls, xml) mais les fichiers de données finaux doivent être convertis au format csv avant d'être insérés dans la base de données. Le format csv a l'avantage d'être un format pérenne. Tous les modèles de fichiers sont disponibles sur ce lien : <http://hplus.ore.fr/en/database/file-templates>. Sur le site web de H+, les modèles sont organisés par différents domaines (données de suivi hydrologiques, campagnes expérimentales, données spatialisées ...), qui comprennent des types spécifiques de données de surveillance, d'expériences et d'analyses.

De nouveaux formats de données sont régulièrement définis pour de nouveaux types de données. Par exemple, un nouveau format a été développé pour les données hydrogéophysiques : les données géophysiques étant très diverses en termes de formats et de configurations de capteurs, l'idée est d'archiver les données géophysiques sous forme d'ensemble de données liés à un forage, un profil ou une carte 2D/3D. Les données sont ainsi sauvegardées dans leurs formats natifs, comme le SEG Y pour les données sismiques, avec une image montrant les données interprétées. Les données brutes et interprétées sont stockées. Elles sont décrites dans un fichier pdf lié aux données. Cette méthode est opérationnelle dans la base de données pour les diagraphies optiques, la Tomographie de Résistivité Electrique (ERT), le sondage par résonance magnétique (RMP) et les profils sismiques (Ploemeur, LSBB, Auverwatch, Larzac, sites associés d'OZCAR), et imagerie sismique 3D (Poitiers). Les nouveaux formats de données récemment développés incluent également les mesures acoustiques, la densité des grains par rayon gamma dans les forages, les mesures par tour de flux et la gravimétrie relative. Les développements actuels concernent en particulier les données génomiques et le formatage est en cours de discussion avec les biologistes.

Responsable technique et fonctionnement du groupe de travail sur la base de données

La responsable du système d'information est Annick Battais (annick.battais@univ-rennes1.fr). Annick Battais assure le développement de l'application et implémente de nouvelles fonctionnalités à partir de des besoins exprimés par la communauté. Elle assure le déploiement, les tests et le suivi des incidents. Elle est responsable de l'installation et de l'administration des serveurs de bases de données et du site web. Cela

consiste à mettre en place les procédures de sauvegardes, la gestion des accès, la configuration de l'application (modèles de données, métadonnées ...) et de la base de donnée, assurer la sécurité de SI et l'optimisation des ressources.

Un groupe de travail sur la base de données se réunit toutes les semaines pour faire le point sur l'évolution de la base et de l'insertion et la mise à disposition des données. Il est composé de Annick Battais, Tanguy Le Borgne (physicien CNAP) et Meruyert Kenshilkova (ingénieur CDD OZCAR). Sylvain Pasquet (ingénieur de recherche OZCAR pour la géophysique) se joint également régulièrement à ce groupe pour faire le point sur l'acquisition des données géophysiques en cours. Des réunions par visio sont organisée toutes les deux semaines pour faire le point individuellement avec les responsables de site et fournisseurs de données principaux.

De votre point de vue, comment évalueriez-vous votre degré de « FAIRisation » de vos données?

Si on se réfère aux principes FAIR, le but est d'améliorer la réutilisation des données issues d'H+. Ceci correspond à des pratiques vers lesquelles nous essayons de tendre :

- **Findable** : les données sont déposées dans une base de données et les jeux de données sont accessibles depuis un serveur de stockage. Les métadonnées sont disponibles depuis Osuris. De plus, la création de DOI pour identifier les jeux de données H+ associés aux publications utilisant des données H+ contribuera à la diffusion des données H+. Depuis 2019, l'OSUR est mandaté par l'INIST pour délivrer des identifiants pérennes. Concernant H+, un DOI a été positionné sur la base de données (<https://doi.org/10.26169/hplus.all>), permettant dans toute publication la citabilité de la base. Cette tâche est à poursuivre et encourager pour des jeux de données remarquables ou associés à des publications (ex. [Dataset DOI](#)). Ces DOI pourront être liés à des requêtes prédéfinies de la base de données et seront indiqués sur la page web de chaque site. Ils contribueront à la diffusion des données hydrogéophysiques disponibles dans la base de données H+.
- **Accessible** : les conditions d'accès sont spécifiées à chaque téléchargement de données. Toutes les données sont disponibles et accessibles moyennant une demande de compte ou librement si c'est le choix du producteur. Il n'existe pas de période d'embargo.
- **Interopérable** : le format d'intégration des données est le format csv. Nous préconisons les formats jpeg, pdf pour les documents associés. Concernant les modèles de données spatialisées, les données brutes peuvent être fournies dans leur format d'origine quand elles sont préconisées par la communauté scientifique (format SEG Y pour la sismique par ex.). Dans le cas où le traitement a été effectué en local, le code source du logiciel qui a permis le traitement et l'analyse des données est fourni. Le standard utilisé pour les métadonnées est l'ISO19115 et nous utilisons le vocabulaire contrôlé du GCMD de la NASA pour décrire les paramètres.
- **Reusable** : la base de données et les jeux de données sont sous licence CC BY-SA-NC <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Theia/OZCAR a proposé un formulaire d'autodiagnostic des pratiques de gestion des données des observatoires (Annexe 7, **Figure 9**). Les résultats montrent que H+ est en bonne voie dans la démarche FAIR. Les progrès les plus importants à faire concerne l'interopérabilité, qui est actuellement notre priorité pour progresser dans cette démarche.

Score de l'observatoire H+ pour le questionnaire FAIR

	F	A	I	R	D
Oui	13	7	2	13	7
partiellement	0	0	2	2	1
non	2	2	1	7	2
sans réponse	0	0	0	0	0
SCORE	84 %	100 %	57 %	73 %	93 %

Figure 9 : Résultat du questionnaire FAIR pour le SNO H+. Les différentes questions ont été rattachées à une des lettres du FAIR ou à une catégorie « D » plus organisationnelle sur la gestion et la mise à disposition des données.

Lien avec les Centres de données nationaux et internationaux :

H+ est directement impliqué dans le travail à long terme visant à définir des outils communs d'archivage de données pour les sciences environnementales. Des progrès ont été réalisés pour l'interopérabilité de la base de données de H+ avec les bases de données des observatoires de Rennes (OSUR) et de Montpellier (OREME) qui regroupent toutes les bases de données environnementales gérées par ces structures (par exemple, les bases de données écologiques). Des discussions sont en cours avec le BRGM et l'INRAE pour utiliser et développer des outils communs d'archivage et de diffusion des données.

Le réseau européen de formation ENIGMA, coordonné par H+, a représenté une étape importante pour la structuration de la recherche expérimentale en hydrogéologie en Europe. 15 doctorants ont travaillé sur les sites avec une forte coopération entre les partenaires. Le réseau H+ a fourni des moyens de coordination et des structures de base de données. Ainsi, les données obtenues sur les sites associés au sein du projet ENIGMA tels que Äspo Hard Rock Laboratory (Suède), Argentona (Espagne), Emme (Suisse), Mons (Belgique), Evi-1 (Danemark) ont été insérées dans la base de données H+.

Quelles actions et outils sont envisagés pour favoriser l'utilisation des données par des utilisateurs extérieurs ?

Un CDD IE/IR (actuellement Meruyert Kenschlikova) est financé depuis 2018 pour coordonner l'insertion et la diffusion des données hydrogéophysiques OZCAR dans la base de données H+, à l'interface entre les responsables de sites OZCAR, les fournisseurs de données et la base de données H+. Des workshops sont régulièrement organisés par les gestionnaires de la base de données H+ pour former les utilisateurs à la saisie et à l'extraction des données de la base H+. Des réunions hebdomadaires ont lieu avec T. Le Borgne, A. Battais et l'ingénieure OZCAR pour coordonner le développement de la base, la définition des formats adaptés et l'insertion des données.

Le projet Européen ENIGMA a également fortement contribué à favoriser l'utilisation de la base de données H+ par des équipes extérieures. Les 15 doctorants du projet ont été formés à la base de données H+ pour apprendre les procédures d'archivage et de diffusion des données. Les étudiants d'ENIGMA ont ensuite publié un lien direct vers le jeu de données dans leurs articles scientifiques ([article exemple 1](#), [article exemple 2](#)), ce qui permet à la base de données d'être largement utilisée. Afin de présenter les avancées en hydrogéophysique, le « White paper » d'ENIGMA de Hermans et al. est en cours de rédaction. Ce manuscrit, destiné à être proposé comme « opinion paper » à HESS vise à être un papier de référence sur l'hétérogénéité 4-D et les processus dynamiques dans les milieux souterrains. Afin d'illustrer la discussion, le manuscrit inclura de nombreuses données géophysiques time lapse ou données hydrogéophysiques 3D venant des sites du SNO H+. Les liens vers ces jeux de données seront donnés dans cet article (ex : [blazevic-et-al-2020-water-data](#), [mari-et-al-2009-ogst-data](#)). La création de jeux de données est maintenant systématique pour les articles qui utilisent les données de H+. En plus de mentionner le réseau H+, ils mettent à disposition leurs données en publiant un lien vers la page web sur le site de H+ dans leurs articles ([exemple](#)), ce qui augmente fortement l'utilisation des données du SNO. Ces pages web sont créées pour ces articles afin de fournir des liens directs vers les jeux de données disponibles ([exemple data web page](#)).

B5. Diffusion et rayonnement scientifique

Les sites du SNO H+ offrent aux équipes des conditions particulièrement intéressantes pour tester de nouvelles méthodes, car ils sont déjà bien instrumentés et documentés à partir de grands jeux de données. La liste des projets et des équipes qui utilisent actuellement les données de H+ est donnée en Annexe 4. Les équipes externes utilisant ou ayant utilisé les données H+ incluent les équipes suivantes :

- en France : Sorbonne Université Paris, UBO Brest, Université de Nantes, Lhyges Strasbourg, LSCE Paris, IFPEN Paris, UPPA Pau, CEREGE Aix, LTHER Grenoble, CEFEM Montpellier, Ecole des Mines de Paris, LTHER Grenoble, Université de Chambéry, Université d'Orsay, Itasca Consultants S.A.S., µQuans
- à l'international : Université de Lausanne (Suisse), Forschungszentrum Jülich - Agrosphere Institute IBG-3 (Allemagne), CSIC Barcelona (Espagne), MIT (USA), Université of East Anglia (RU), Oregon State

University (USA), Université de Liège (Belgique), Universität de Bochum (Allemagne), Politecnico di Milano (Italie), Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie (Luxembourg), Virginia Tech (USA), Université de Neuchâtel (Suisse), Université de Prague Charles (La République Tchèque), University of Oxford (RU), University of California at Long Beach (USA), University of Balearic Islands (Espagne), University of Mons (Belgique), Los Alamos National Lab (USA National), National Geophysical Research Institute (Inde).

La liste des articles avec DOI, des thèses pour la période des années 2017-2021 ainsi que la précision sur la citation de H+ est fourni dans les Annexes 5 et 6. Globalement, le réseau H+ publie de 15 à 20 articles scientifiques de rang A par an en moyenne, le plus souvent dans les revues phares du domaine. Une vingtaine de thèses ont été également soutenues ou initiées au cours de la période d'évaluation (2017-2021) en lien avec les sites d'H+.

Actuellement, 500 demandes et le même nombre de jeux de données ont été enregistrés. La taille des jeux de données varie de 50 kb à plus de 1 GB (pour la piézométrie). Les statistiques des téléchargements par an du module Google Earth (GE) et de la base de données sont fournies ci-dessous :

- En 2017 - 194 téléchargements de jeux de données ont été effectués dont 46 depuis la base de données et 32 pour le module GE.
- En 2018 - 665 téléchargements de jeux de données ont été effectués dont 104 depuis la base de données et 79 pour le module GE (Un cours était dirigé par Tanguy Le Borgne et les doctorants d'Enigma déposaient les fichiers de données).
- En 2019 - 236 téléchargements de jeux de données ont été effectués dont 99 depuis la base de données et 98 pour le module GE.
- En 2020 - 413 téléchargements de jeux de données ont été effectués dont 63 depuis la base de données et 225 pour le module GE.
- En 2021 - 317 téléchargements de jeux de données ont été effectués dont 266 depuis la base de données et 57 pour le module GE.

Concernant les rapports et publications, décrire la politique de remerciements pour l'utilisation des données et la politique de justification du statut de co-auteurs pour les responsables du SNO impliqués.

Les règles classiques d'utilisation et de publication des données doivent être respectées (citations, remerciements...). Les accords doivent être obtenus au préalable auprès des fournisseurs de données. Dans tous les cas, la source des données doit être mentionnée dans la publication ou dans les remerciements sous la forme "*Données du réseau national de sites hydrogéologiques H+, www.hplus.ore.en*". Tout utilisateur de données doit informer le propriétaire des données et lui soumettre chaque article qui utilise les données, avant la transmission à une revue. Lors de l'utilisation des données dans un article publié, chaque utilisateur s'engage à envoyer une copie de son article à un responsable du réseau H+.

Indiquer si les données du SNO sont utilisées par des modèles, et si oui lesquels et pour quel objectif ?

La modélisation est un pilier de H+, elle est considérée comme une synthèse des connaissances actuelles, bien que les données/expériences soient basées sur un site spécifique. Grâce à ses fortes capacités expérimentales sur le terrain et à son groupe de jeunes scientifiques de haut niveau, la base de données de H+ fournit à la communauté scientifique des données qui font cruellement défaut, notamment l'évaluation *in situ* des vitesses d'écoulement et des propriétés hydrauliques du sous-sol, le suivi géophysique des propriétés de transport et de réaction, et la caractérisation multi-échelle des flux d'eaux de surface et souterraines. Un objectif constitutif de l'observatoire H+ est d'améliorer la modélisation de l'hétérogénéité du sous-sol, des flux et des réactions biochimiques. Faire le lien avec la communauté des modélisateurs est donc une préoccupation constante de l'observatoire. De manière générale, la plupart des publications du réseau H+ reposent à la fois sur des données d'H+, mais aussi de la modélisation pour interpréter dans un cadre contextuel les données.

Les données sont-elles utilisées dans d'autres contextes que la recherche (bureau d'études, contrats de partenariat ou prestations basées sur les données du SNO...)

Les équipes H+ sont fortement impliquées dans les développements expérimentaux et technologiques pour l'imagerie des structures, flux et processus hétérogènes du sous-sol. Ces techniques sont souvent développées en collaboration avec des entreprises développant de nouvelles technologies. Les développements instrumentaux comprennent : la mesure distribuée spatialement de la température et des flux par fibre optique DTS (avec le partenaire industriel SILIXA), le développement d'un nouveau gravimètre quantique absolu qui peut être utilisé pour des études de terrain (avec le partenaire industriel MuQuans), le développement de méthodes de caractérisation des roches fracturées pour les systèmes d'énergie géothermique (avec le partenaire industriel Antea group). Les sites H+ sont particulièrement utiles pour démontrer l'intérêt des nouveaux instruments et méthodologies.

Par ailleurs, l'intégration du BRGM dans le réseau H+ consolide le lien entre la science H+ et les applications opérationnelles. De plus, des programmes scientifiques sont en cours avec l'Agence française de l'environnement et de l'énergie (ADEME) et des entreprises telles que le groupe Antea pour transférer les méthodes expérimentales et de modélisation développées dans H+ à des applications telles que les systèmes géothermiques ou l'assainissement des sols. À Ploemeur, les données du site sont synthétisées régulièrement à travers des présentations didactiques auprès de Lorient Agglomération, afin de transmettre l'avancée des connaissances sur le fonctionnement du site. En Inde, les sites sont utilisés pour tester des outils d'aide à la décision dédiés à une gestion durable des ressources en eau souterraine, qui seront utilisés par les départements locaux des eaux souterraines et le Central GroundWater Board. La liste des contrats de recherche et industriels résultant de l'activité de SNO H+ est donnée en Annexe 2.

B6. Communication, formation, diffusion des connaissances, impact socio-économique et enjeux pour les ODDs

Communication et diffusion des connaissances

Les équipes de H+ participent à des activités d'engagement public pour expliquer les résultats scientifiques (au moyen de vidéos et de schémas simples) au grand public. Pour mener à bien ces activités, les scientifiques de H+ entretiennent des contacts réguliers avec les fonctionnaires, les autorités locales et les journalistes et profitent d'événements publics pertinents pour exposer les résultats scientifiques et comprendre les besoins du public, comme la "Fête de la science", qui donnent aux chercheurs l'occasion d'avoir une interaction directe avec le public local. En outre, des visites de terrain sont organisées pour le grand public ainsi que pour des cabinets de conseil en géo-environnement sur les infrastructures des champs H+ afin d'expliquer les principes et les intérêts des techniques d'imagerie développées. Par exemple, l'association française des hydrogéologues travaillant dans les institutions et agences publiques a organisé sa visite annuelle à Ploemeur en 2009. Une vidéo scientifique à destination du grand public "Rendre visible le monde des eaux souterraines" (Figure 10) a été réalisée, sous la direction de Camille Bouchez (postdoc Géosciences Rennes) en 2019, à l'occasion des 80 ans du CNRS⁵⁷.

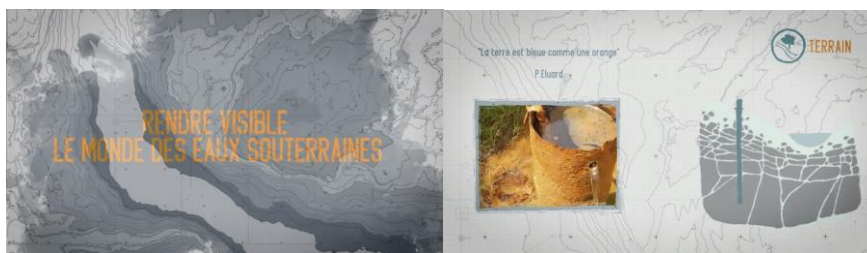


Figure 10 : capture d'écran de la vidéo "Rendre visible le monde des eaux souterraines" réalisée par Camille Bouchez (Géoscience Rennes).

⁵⁷ <https://www.youtube.com/watch?v=fTFC5wVkJQHY&feature=youtu.be>

Par ailleurs, plusieurs vidéos montrant les expérimentations sur les sites H+ ont été réalisées par les doctorants ENIGMA travaillant sur les sites d'H+ : suivi géophysique d'une expérience d'infiltration sur le site de Ploemeur par Lara Blazevic⁵⁸, expérience de traçage sur le site de Hyderabad par Richard Hoffman⁵⁹. Naomi Mazilli a été interviewée par France 3 dans le cadre de l'émission "Faut pas rêver"⁶⁰. Par ailleurs, un article de vulgarisation présentant le réseau H+ a été publié dans la revue *Géologues*⁶¹.

H+ contribue également à la sensibilisation de la communauté politique. Le défi pour les décideurs politiques est de prendre des décisions appropriées pour développer des stratégies d'exploration du sous-sol et des réseaux de surveillance adéquats, ainsi que de mieux comprendre les risques et les opportunités associés à l'hétérogénéité du sous-sol. Ainsi, un accent particulier est mis sur la diffusion des résultats du projet auprès des agences politiques (par exemple, les conseils régionaux et les agences de l'eau et du sol). Un lien direct avec la communauté politique est établi à travers le partenaire associé BRGM, qui est le principal référent pour la politique des eaux souterraines en France.

Formation

Des actions de formation sont régulièrement organisées sur les sites de H+. De nombreux stages de terrain ont lieu chaque année pour accueillir les étudiants de Licence ou de Master. Ces stages sont des plateformes idéales pour à la fois aborder des notions basiques en hydrogéologie, sur le cycle de l'eau souterrain, les interactions surface-profond, mais aussi pour mettre en pratique des méthodes et techniques d'imagerie en forage ou de surface. Ces formations, souvent très professionnalisantes sont très appréciées par les étudiants qui y voient l'occasion d'aborder de façon concrète et appliquée les notions et connaissances qu'ils ont abordées en cours. Certains sites, comme le site de Poitiers, développent de nombreuses formations externes sur le site expérimental (tests hydrauliques, expériences de traçages, diagraphies de forages) pour l'ENSEGID-Bordeaux, l'IFP School et l'ISTO-Orléans. Dans le domaine de la formation professionnelle, outre les stages de terrain organisés pour certaines formations en alternance (Auverwatch), un partenariat a été signé en février 2014 entre IFPEN formation, le CNRS et l'université de Poitiers pour l'utilisation du site de Poitiers comme réservoir analogue pour les formations sur la géophysique, la géologie et l'ingénierie des réservoirs dans IFPEN formation.

Certaines actions de formations ont également une portée internationale. Ainsi, le site de Ploemeur a accueilli un workshop international en 2017 dans le cadre de l'ITN ENIGMA afin de former l'ensemble des doctorants du réseau ITN à la caractérisation des milieux fracturés. Un autre stage est prévu en octobre 2021 pour accueillir les étudiants de Master de l'Université d'Oslo. Les sites du réseau H+ accueillent également de nombreux doctorants et de post-doctorants (voir annexes 3, 5 et 6) qui participent aux tâches d'observation et bénéficient d'un cadre idéal pour effectuer leurs travaux de recherche.

Impact socio-économique et enjeux pour les ODDs

Des collaborations actives sont développées avec des partenaires industriels pour transférer les connaissances et le savoir-faire acquis sur les sites H+ vers des applications. Cela inclut la gestion des ressources en eau (agences de l'eau locales et régionales/BRGM/Auverwatch/Ploemeur/Hyderabad), l'énergie géothermique (groupe Antea/BRGM/Ploemeur), le stockage des déchets et la modélisation du réseau de fractures (ITASCA/SKB/Ploemeur), l'extraction du pétrole (TOTAL/LSBB), la détection de température distribuée par fibre optique et la détection acoustique distribuée (SILIXA/Ploemeur/Poitiers), les gravimètres absolus (muQuans/Larzac/LSBB). Ces collaborations prennent différentes formes :

Développement d'infrastructures pour la compréhension des environnements de subsurface. Les partenaires sociétaux et industriels investissent sur les infrastructures H+ pour acquérir des connaissances sur le fonctionnement des systèmes de subsurface qui les intéressent directement. L'agence régionale de l'eau finance directement l'instrumentation et l'analyse des eaux sur le site d'Auverwatch pour comprendre

⁵⁸ <https://youtu.be/-6NQYRffDfw>

⁵⁹ <https://youtu.be/cx6s4cGj1sc>

⁶⁰ <https://www.france.tv/france-3/faut-pas-rever/1078629-en-provence-les-amoureux-du-ventoux.html>

⁶¹ Gerard et al. *Géologues*, Revue officielle de la Société Géologique de France, 195, 22-27, 2018.

le devenir des contaminants émergents dans les ressources en eau régionales. La ville de Ploemeur et Lorient Agglomération ont collaboré activement avec l'Université de Rennes, notamment en finançant des forages, pour améliorer la compréhension de l'aquifère fracturé de Ploemeur, qui constitue une ressource en eau importante dans la région. Le BRGM, le NGRI et le gouvernement local ont collaboré étroitement pour développer le site d'Hyderabad afin de tester des outils d'aide à la décision dédiés à une gestion durable de la ressource en eau souterraine. Enfin, TOTAL a récemment financé le forage de puits carottés sur le site du LSBB, qui sert d'analogie, en termes de structure et de processus, aux réservoirs pétroliers. IFPEN (Institut Français du Pétrole - Energies Nouvelles) organise chaque année un voyage d'étude pour former des étudiants sur le site de Poitiers, qui est également considéré comme un analogue d'un réservoir pétrolier calcaire karstifié et qui a été conçu selon le système d'extraction pétrolière en cinq points pour la localisation des forages.

Échange de nouveaux concepts pour la gestion des systèmes hétérogènes. Au cours de la dernière décennie, il y a eu une interaction continue concernant la caractérisation et la modélisation des processus d'écoulement et de transport dans les milieux fracturés entre le site de Ploemeur, le site SKB pour le stockage des déchets, l'Université de Rennes et la société de conseil ITASCA. Cela a conduit au développement de nouveaux concepts de caractérisation hydrogéophysique (Shakas et al. 2016, 2017⁶²) et de modélisation des réseaux de fractures (Davy et al., 2018⁶³, Molron et al., 2020, 2021⁶⁴), qui sont testés à la fois sur le site de Ploemeur et sur le site SKB. Par ailleurs, la compréhension du lien entre le mélange en milieu hétérogène et le développement de biofilms, observé pour la première fois sur le site de Ploemeur (Bochet et al., 2020²⁵), a été utilisée pour expliquer les processus de bioclogging perturbant les opérations géothermiques en collaboration avec Antea group (Burté et al., 2019⁶⁵).

Développements technologiques. Les instruments et méthodes développés et testés sur les sites de H+ sont souvent conçus en collaboration avec des entreprises développant de nouvelles technologies. Parmi les développements instrumentaux, on peut citer : la mesure distribuée de la température et des flux par fibre optique DTS (avec le partenaire industriel SILIXA), le développement d'un nouveau gravimètre quantique absolu pouvant être utilisé pour des études de terrain (avec le partenaire industriel MuQuans), le développement de méthodes de caractérisation des roches fracturées pour les systèmes d'énergie géothermique (avec le partenaire industriel Antea group). Les sites H+ sont particulièrement utiles pour démontrer l'intérêt des nouveaux instruments et méthodologies. Une démonstration à grande échelle a été organisée en 2015 pour la surveillance par fibre optique de la température de subsurface en 3D et des mesures acoustiques sur le site de Poitiers, en collaboration avec des partenaires industriels et des partenaires académiques français.

Transfert de connaissances aux utilisateurs finaux. En Inde, la gestion des eaux souterraines est devenue un enjeu crucial pour les autorités. L'agriculture (et des millions d'agriculteurs) est fortement dépendante de l'état des ressources en eau souterraine. Une approche simplifiée du bilan hydrique a été développée et appliquée à des régions irriguées dans des conditions semi-arides afin de simuler les changements de niveau d'eau dans les aquifères surpompés. La méthode est capable de simuler les fluctuations des niveaux d'eau induites par les changements dans le modèle de culture et les stratégies de pompage (Dewandel et al. 2010⁶⁶). La méthode est implémentée dans une feuille Excel qui peut être utilisée par les agences locales de l'eau (départements des eaux souterraines de l'Andhra Pradesh ou du Telangana, Central Groud Water Board) pour estimer les adaptations nécessaires des pratiques agricoles afin de retrouver un budget d'eau équilibré et de lutter contre l'épuisement à long terme des nappes phréatiques. L'outil peut être utilisé par les ONG afin d'illustrer les effets des pratiques d'économie d'eau sur la profondeur de l'eau. De nombreux

⁶² Shakas et al. *Water Resources Research*, 52(2):938--953, 2016. [DOI](#). Shakas et al. *Geophysical Research Letters*, 44(8):3663--3671, 2017. [DOI](#)

⁶³ Davy et al. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(4), 1393-1407. [DOI](#). Davy et al. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(8), 6521-6539. [DOI](#)

⁶⁴ Molron et al. *Engineering Geology*, 273:105674, 2020. [DOI](#)

⁶⁵ Burté et al. *Environmental Science & Technology*, 53(10):5848--5857, 2019. [DOI](#)

⁶⁶ Dewandel et al. *Hydrological Processes*, 24(19):2784--2797, 2010. [DOI](#)

travaux ont été menés également pour caractériser les conditions de recharge naturelle ou artificielle dans ces milieux fortement hétérogènes (Marechal et al., 2018 ; Nicolas et al., 2019 ; Mizan et al. 2019).

B7. Apports aux communautés nationale/européenne/internationale et avec les IR

Liens avec d'autres SNO, insertion du SNO dans le dispositif de recherche français (régional, national, IR)

Un schéma de positionnement du SNO H+ dans le dispositif de recherche français est donné dans la **Figure 11** afin de synthétiser l'apport du SNO H+ à l'ensemble de la communauté. En 2017, le SNO H+ a été intégré à l'infrastructure de recherche OZCAR (IR Observatoires de la Zone Critique Applications et Recherches). Les équipes H+ sont fortement impliquées dans la structuration et les projets scientifiques de l'infrastructure OZCAR. Les scientifiques du réseau H+ participent chaque année aux journées OZCAR et participent régulièrement au workshop sur la zone critique organisé le jour précédant l'AGU Fall meeting. Par ailleurs, la participation de Jérôme Gaillardet au comité d'évaluation H+ a permis d'approfondir la discussion sur l'intégration du réseau H+ au sein de l'infrastructure OZCAR. Le numéro spécial de Vadose Zone Journal sur les observatoires hydrologiques a été une excellente opportunité de mettre en valeur les sites des réseaux H+ et RBV. L'ensemble du réseau H+ a ainsi largement contribué à l'élaboration de l'article décrivant l'IR OZCAR (Gaillardet et al., VZJ, 2018⁶⁷).

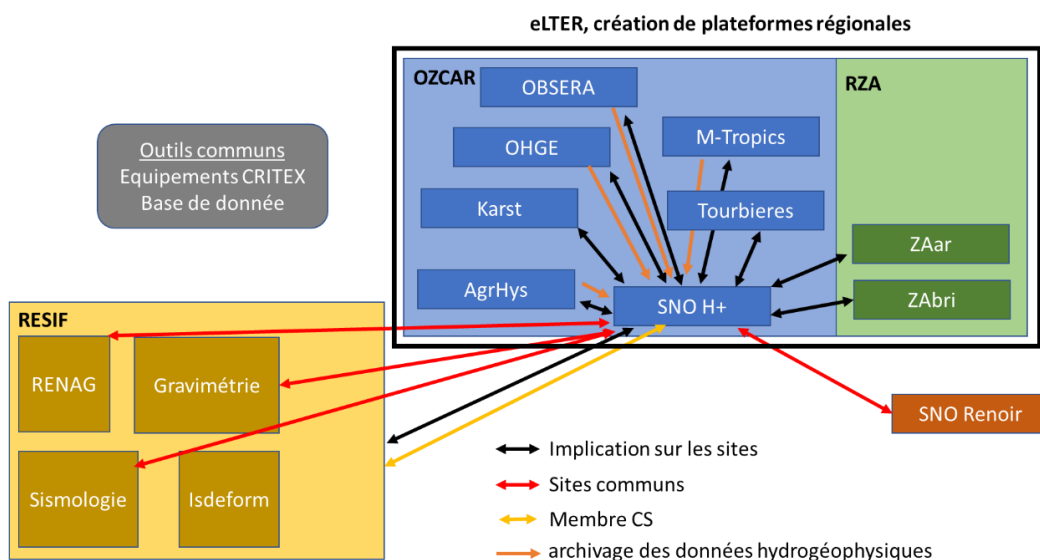


Figure 11 : Schéma de positionnement de H+ dans le dispositif de recherche Français et Européen

Du point de vue scientifique, les équipes H+ ont initié de nouveaux projets avec les équipes de l'IR OZCAR. Les scientifiques du réseau H+ ont participé activement à la rédaction de trois projets soumis à l'appel d'offre CRITEX pour développer des projets en collaboration avec les autres observatoires de l'IR OZCAR :

- Towards quantitative critical zone monitoring with passive geophysical methods,
- High frequency temperature monitoring as a groundwater tracer of flow and biogeochemical reactions in the critical zone
- Water chemistry monitoring for hot-spots and hot-moments characterization in the Critical Zone

Le rapprochement du SNO H+ et de l'IR OZCAR a également beaucoup contribué à l'émergence du projet PIA3 Terra Forma qui vient de débuter et dans lequel le SNO H+ est très fortement impliqué. Ce projet rassemble une large communauté allant des écologues aux hydrogéologues en intégrant les aspects sociétaux. Au sein d'OZCAR des interactions fortes sont également tissées avec de nombreux autres SNOs. Enfin, de par son positionnement affirmé en hydrogéophysique, le SNO H+ développe de nombreux liens avec l'IR RESIF.

⁶⁷ Gaillardet et al. *Vadose Zone J.* 17:180067. [DOI](#)

Insertion européenne et internationale, appartenance à un réseau européen ou international d'observation (lettres de soutien à fournir en annexe).

Depuis 2020, le SNO H+ participe activement au projet eLTER-plus et eLTER-PPP via l'observatoire du Larzac, ainsi qu'à la cellule eLTER-France core Team. H+ participe également activement à la structuration nationale au sein de l'IR OZCAR par son implication dans la construction de plateformes régionales au format eLTER avec les observatoires de l'infrastructure RZA, telle que la plateforme AAA (Anthropogenic Atlantic Landscape) en Bretagne, plateforme de coordination inter-régionale d'observation – AgrHys, ZAar Zabri, Ploemeur, PFC (<https://osur.univ-rennes1.fr/news/glaz-le-projet-cper-2021-2027-sur-lenvironnement-continentale-et-littoral-en-bretagne.html>).

Actions mises en œuvre pour ouvrir le SNO à des équipes extérieures.

Les sites H+ sont des plateformes d'observation et d'expérimentations ayant pour vocation d'accueillir des équipes internationales (voir annexe 4). La coordination du projet ITN ENIGMA est emblématique de cette démarche qui est au cœur du SNO H+. Le projet, réunissant les principales équipes Européennes du domaine, a financé de nombreux échanges et 15 doctorants, représentant une action majeure pour ouvrir le SNO à des équipes extérieures. Par ailleurs, deux projets Marie Curie s'appuyant sur le site de Ploemeur-Guidel ont débuté en 2020 : Maria Klepikova (transfert de chaleur) et Sarah Coffinet (Interactions microorganismes et matière organique : Impact de l'activité microbienne sur le cycle du carbone dans les zones humides).

B8. Gouvernance

L'organigramme du SNO est représenté dans la **Figure 12**. Le comité de pilotage, qui comprend le directeur scientifique, les responsables scientifiques adjoints et les responsables de site, coordonne le réseau et s'assure qu'il atteint ses objectifs en termes de fonctionnement du site, de progrès scientifiques et de stockage et de diffusion des données. Depuis 2008, l'observatoire H+ dispose d'un comité scientifique international, dont le rôle est de fournir une évaluation indépendante de la gestion et des résultats du réseau et des propositions pour son évolution future. Une nouvelle physicienne adjointe, Camille Bouchez, rejoindra le réseau en Septembre après avoir réussi le concours CNAP en juin.

Les décisions concernant le budget, la gestion du réseau et la prospective sont prises lors des réunions de H+ qui ont lieu en moyenne deux fois par an. Le comité de pilotage encourage les nouveaux développements instrumentaux sur les sites afin d'améliorer les mesures et de stimuler l'activité scientifique. Le comité de pilotage a également la responsabilité de développer de nouveaux partenariats scientifiques avec les équipes susceptibles d'apporter des contributions scientifiques sur le plan expérimental ou de la modélisation. Le site d'Hyderabad, piloté par le BRGM, participe au réseau mais ne reçoit pas de financement direct, à l'exception des frais de déplacement pour les réunions et les expériences communes. L'animation scientifique se fait à travers des rencontres régulières organisées par l'une ou l'autre des équipes d'H+, à raison de 2 rencontres par an en moyenne. Outre les présentations de chaque site, des présentations scientifiques des doctorants ou post-doctorants permettent d'illustrer certains résultats ou avancées. Des scientifiques extérieurs, souvent internationaux sont fréquemment invités lors de ces rencontres pour créer une animation scientifique dans un domaine ou un autre. L'un des derniers grands temps forts de ces rencontres a été l'organisation de l'évaluation du SNO H+ par un comité international d'évaluation en 2018.

La montée en puissance de l'IR OZCAR a un peu bousculé l'organisation interne d'H+ en augmentant le nombre de rencontres. Face à la crise du Covid19, qui a fortement impacté les rencontres en présentiel, des rencontres virtuelles ont été organisées tous les deux ou trois mois afin d'échanger régulièrement entre les sites et la direction du SNO. Pour le prochain mandat, nous souhaitons formaliser ces échanges en conservant des rencontres virtuelles tous les deux mois entre les responsables de sites et la direction d'H+ et en organisant une rencontre annuelle thématique focalisée sur de l'animation scientifique et la

présentation des travaux des doctorants, post-doctorants, jeunes chercheurs recrutés, responsables de sites et invités extérieurs.

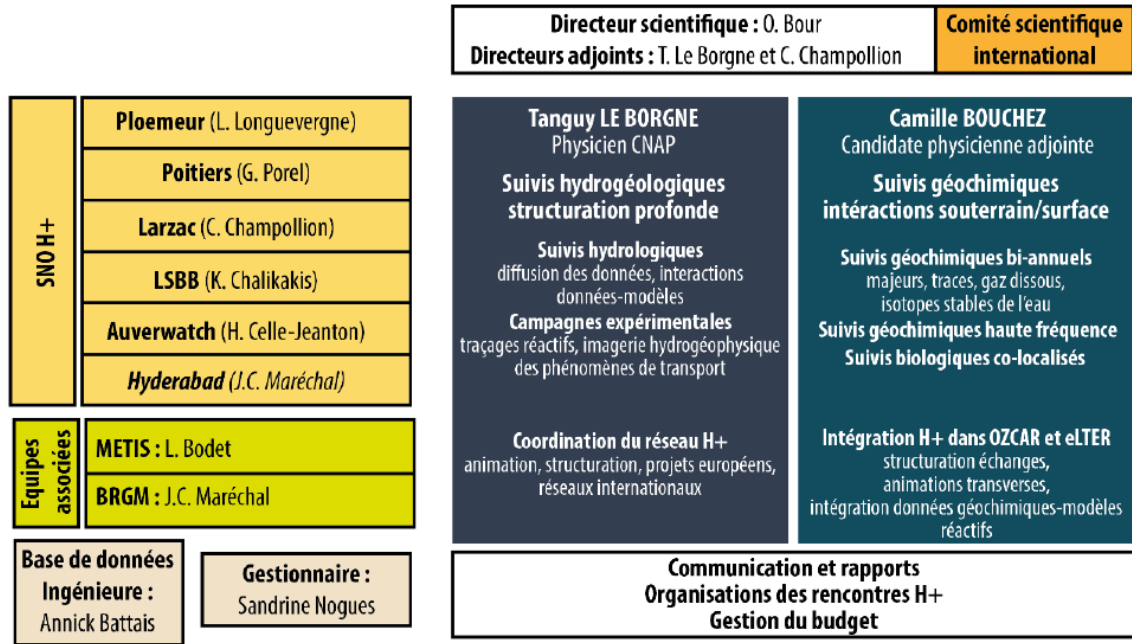


Figure 12 : Schéma de gouvernance du SNO H+. Camille Bouchez, candidate au concours CNAP 2021, a été classée en première position et prendra ses fonctions au sein du SNO H+ en Septembre.

B9. Fonctionnement et ressources humaines (hors exploitation scientifique)

Un état des lieux de l'organisation du service et de ses ressources instrumentales et humaines du SNO H+ sur les sites principaux est présenté dans la Figure 13. Le tableau synthétisant l'ensemble des ressources humaines du SNO H+ est présenté en annexe 2. L'engagement de l'unité hôte (OSUR) est également fourni en annexe 8. Outre la direction, la coordination des observatoires et la base de données, qui implique 6 personnes, chaque site implique fortement 4 à 10 permanents (chercheurs, enseignants chercheurs et personnels techniques) dans les tâches d'observations sans compter les nombreuses collaborations externes qui contribuent à l'exploitation scientifique.

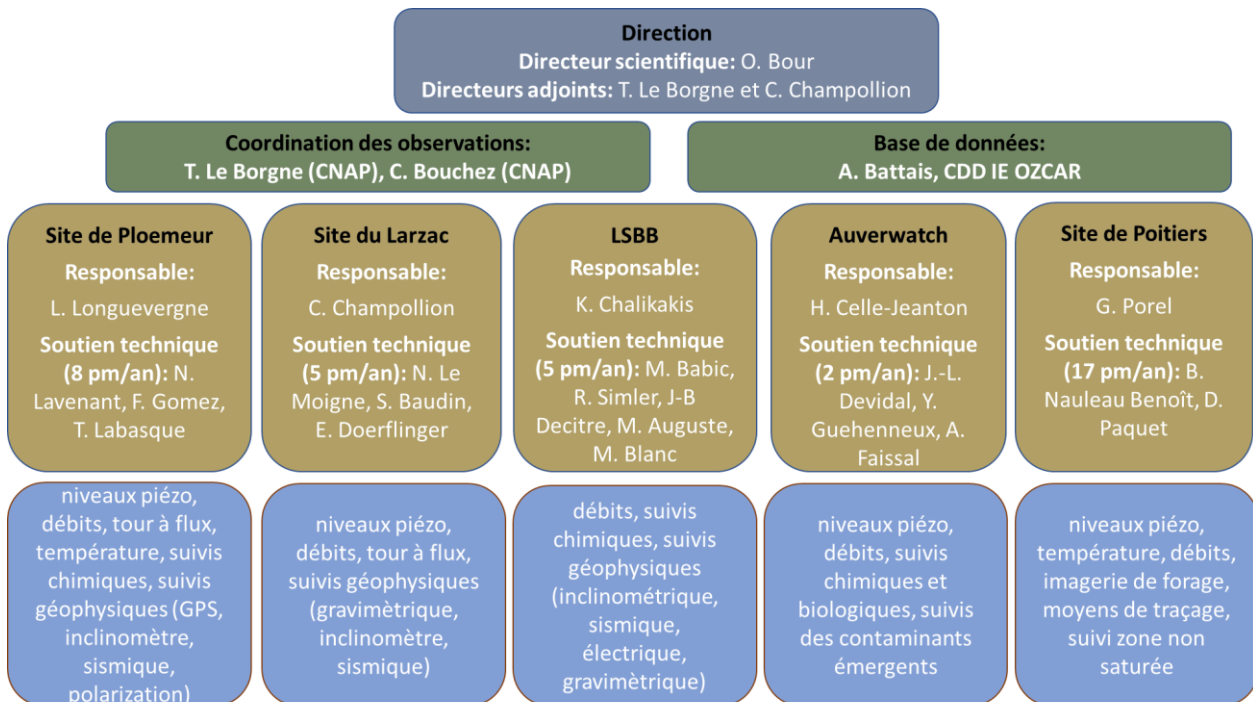


Figure 13 : Organigramme présentant un état des lieux de l'organisation du service et de ses ressources instrumentales et humaines du SNO H+ sur les sites principaux (hors sites et équipes associées).

H+ dispose d'un physicien CNAP, Tanguy Le Borgne, depuis 2007, rejoint en 2021 par une physicienne adjointe, Camille Bouchez (dont les tâches sont décrites dans la section B13). T. Le Borgne est en charge de la coordination du service. Sa mission est d'assurer le fonctionnement global de l'observatoire en tant que réseau de sites hydrogéologiques, d'instruments de mesure et d'équipes de recherche. Ses tâches de service comprennent notamment la coordination des expériences impliquant différentes équipes, la mise en commun des outils et des compétences, la coordination de la base de données et l'organisation des rencontres H+. Il s'agit en particulier de recenser les besoins des différents sites chaque année et les problèmes éventuels pour garantir la maintenance des instruments en place, aider à l'émergence de nouvelles thématiques scientifiques et favoriser l'attractivité internationale des sites. Ceci nécessite un dialogue régulier avec les responsables de sites et une concertation globale pour la répartition des ressources et des outils. Dans ce cadre, il a notamment élaboré et co-porté le projet ITN ENIGMA, qui a financé 15 doctorants de 2016 à 2021 et fortement augmenté la visibilité internationale des sites H+ et les échanges avec les partenaires Européen. Il assure également la gestion administrative du service d'observation: la diffusion de l'information au sein du réseau et vis-à-vis de la communauté scientifique (mise en ligne des informations et diffusion des données), la supervision du site web, la gestion des crédits et la rédaction des rapports scientifiques et projets visant à faire évoluer le service d'observation. Enfin, il participe au comité exécutif OZCAR et pilote des WPs dans les projets equipex CRITEX et Terra Forma.

B10. Budget

Une synthèse du budget total du SNO H+ pour la période 2017-2022 est donnée dans le tableau 2. Les détails des budgets par site sont donnés en Annexe 3. Le soutien de base dont bénéficie le SNO H+ est actuellement de 38 k€ par an, ce qui correspond à environ 1 % du budget global du SNO. Le financement propre du SNO exerce ainsi un très fort effet de levier pour obtenir des projets et financements complémentaires. Le SNO reçoit par ailleurs un soutien annuel de l'IR OZCAR de l'ordre de 45 k€/an pour le développement de la base de données hydrogéophysiques H+ et son ouverture aux sites OZCAR, via le rectement d'un IE. Ce soutien est primordial et permet à l'IR OZCAR de se doter d'une base de données géophysique unique sur le plan international.

La répartition du budget est décidée chaque année avec le comité de pilotage du SNO. En général, 7 à 10 k€ sont réservés pour la base de données et l'animation du réseau (rencontres scientifiques), 4 à 6 k€ pour le soutien à des projets particuliers intéressant l'ensemble du réseau, ce qui laisse à peu près 25 k€ pour le fonctionnement des sites, soit de 5 à 7 k€/an en moyenne par site pour assurer les tâches d'observation. A noter que le site d'Hyderabad, qui est géré par le BRGM, est associé au réseau H+, mais ne bénéficie pas de soutien direct de l'INSU, hormis les frais de participation aux réunions du réseau. Le site Auverwatch ne demande pas de financement pour les suivis qui sont financés par des projets régionaux et les financements du SNO pour ce site sont axés sur des actions de collaboration (ex : installation fibre optique).

Budget 2017-2022	Total (k€)
Fonctionnement	575
Equipement	950
CDD	1651.5
TOTAL	3176.5
Récurrent CNRS INSU	190
Récurrent autres organismes (Universities, OSU, OZCAR, ...)	395
Projets régionaux, nationaux et européens	1944.5
Entreprises	647

Tableau 2 : synthèse du budget du SNO H+ sur la période 2017-2021

Malgré la faible proportion qu'il représente, le budget propre du SNO joue un rôle très important par son caractère récurrent pour garantir le maintien des sites sur le long terme. Néanmoins, avec le transfert du budget SOERE vers l'IR OZCAR, ce budget est devenu trop faible pour assurer l'ensemble des frais liés aux missions sur site, à la jouvence et au remplacement des capteurs, à la mise en place de nouveaux capteurs ou encore à l'animation scientifique des sites et aux expérimentations et campagnes de mesure. Il faut noter que le soutien de base dont bénéficiait auparavant H+ était de 60 k€ jusqu'à 2011, ce qui correspond pour le SNO à un optimum pour maintenir le fonctionnement de l'infrastructure et stimuler l'effet levier décrit plus haut. Il avait été convenu avec la direction de l'INSU de le diminuer sur la période 2012-2018 du fait de l'apport supplémentaire du SOERE H+. A l'occasion de cette nouvelle labellisation, nous souhaiterions donc une réévaluation du budget du SNO H+ à hauteur de 60k€. Le détail de la demande de soutien est donné dans le tableau 3 et intègre l'animation du réseau, le maintien de la base de données, et les crédits nécessaires pour le fonctionnement des sites, y compris la jouvence des capteurs et équipements installés ainsi que le déploiement de la télémétrie sur l'ensemble des sites.

Demande de soutien récurrent INSU sur la période 2022-2026		
Nature ²	Montant (k€)	Commentaire
Consolidation et jouvence du réseau d'observation (capteurs, suivi géophysique, tour à flux)	75	Le budget récurrent actuel ne permet pas la jouvence du réseau de capteur, qui est très dépendant de financements sur projet et ne garantit pas la pérennité du dispositif
Déploiement généralisé de la télémétrie sur les réseaux de capteurs	45	Diminution de la charge sur des personnels techniques
Fonctionnement (consommables, petits équipements, missions)	75	Missions de relevé, maintenance et campagnes d'expérimentation sur les sites
Analyses chimiques	40	Observations récurrentes long-terme
Base de données	15	Remplacements des serveurs
Animation du réseau	50	Rencontres scientifiques, invitation de chercheurs Soutien aux projets internes, ou à des investissements particuliers
TOTAL	300	Soit 60 k€/an

Tableau 3 : synthèse de la demande de soutien INSU pour 2022-2026

B11. Difficultés rencontrées

La principale difficulté rencontrée au sein du réseau H+ vient souvent de ressources humaines en tension pour participer ou contribuer aux observations, aux développements techniques, ou à l'insertion des données dans la base de données. Installer de nouveaux capteurs, en assurer la maintenance ou encore télécharger les données est souvent une tâche qui nécessite une forte implication surtout dans les conditions de terrain qui sont parfois difficiles. De la même manière, l'alimentation régulière de la base de données demande un investissement non négligeable pour se familiariser avec les formats de fichier, vérifier et valider la qualité des données. Une certaine disparité existe en terme d'implications de personnels (chercheurs, enseignants-chercheurs et personnels techniques) entre les différentes équipes du SNO H+. Mais la plupart des équipes sont sous pression face à l'ampleur des tâches à réaliser lorsque l'on souhaite animer les sites et maintenir des suivis et tâches d'observations originales et complémentaires pour renseigner sur le fonctionnement de la zone critique profonde qui reste très sous-échantillonnée.

Pour répondre à ces besoins en ressources humaines, les charges d'observation s'appuient également sur des personnels en CDD. Ce fonctionnement a permis de maintenir les tâches d'observation, mais reste fragile, soumis aux aléas des financements et des recrutements, et à l'évolution des personnels. Ainsi, les personnels impliqués en tant que responsables de sites ou du SNO H+ portent également de nombreuses responsabilités collectives (responsabilités de Licence ou de Master, d'unité, d'UFR), ou sont impliqués dans le portage de grands projets Européens (ITN, ERC) ou de projets PIA (CRITEX, TERRA FORMA) ou dans divers mandats (Section 30 du CNRS, section CNAP SCOA). Sachant que beaucoup de scientifiques impliqués dans le SNO sont des enseignants-chercheurs, cela limite aussi leur capacité à s'investir dans les projets d'observation, l'animation et la coordination des sites.

Pour pallier ces difficultés, plusieurs solutions ont été envisagées. La première solution consiste bien entendu à essayer de recruter de jeunes chercheurs et/ou des personnels techniques. Le recrutement de jeunes MCF reste actuellement très aléatoire dans les universités qui limitent fortement leur masse salariale. Le recrutement de personnel CNAP, même s'il a été possible cette année, reste assez exceptionnel dans l'évolution d'un SNO. Enfin, il s'avère également très difficile de recruter au niveau Technicien ou Assistant-Ingénieur malgré les besoins évidents de personnels techniques pour les tâches d'observations. Une solution alternative et intéressante est en discussion depuis quelques années entre l'INSU et certaines universités pour prendre en compte les tâches d'observations dans les services des enseignants-chercheurs.

Du point de vue technique, une autre solution consiste à déployer d'une manière généralisée la télémétrie sur les réseaux de capteurs. Pour l'instant, seule une partie des capteurs est connectée, ce qui facilite grandement la maintenance préventive. L'élargissement de la télémétrie à l'ensemble des capteurs, qui est prévu pour le prochain mandat, devrait faciliter leur suivi et maintenance.

Enfin, l'enjeu est de fédérer les forces et d'arriver à en mobiliser de nouvelles autour des sites. Cela nécessite souvent un investissement important en animation, mais c'est une stratégie qui à terme se révèle très fructueuse, en termes de renouvellement scientifique mais aussi de financements. C'est la stratégie choisie par la plupart des sites, comme par exemple le site du Larzac dans le cadre du projet eLTER-plus. C'est aussi le cas du site de Ploemeur qui a su faire évoluer ses questions scientifiques autour des relations surface-profond, des cycles biogéochimiques et des interactions eau-roche-biota, ce qui a permis d'impliquer une quinzaine de personnes supplémentaires.

B12. Aspects remarquables du SNO sur la période d'évaluation

Les points forts du réseau H+ sur la période d'évaluation sont les suivants (voir également le rapport du comité scientifique internationale de H+ en 2018²) :

Une identité affirmée et reconnue en hydrogéophysique, mais qui se diversifie à d'autres thèmes scientifiques. Le réseau produit, en moyenne, 15 à 20 publications par an, dont un grand nombre dans les meilleures revues du domaine et certaines dans des journaux à fort impact (e.g. Bochet et al. 2020²⁵). H+ fonctionne bien en tant que réseau : 20% des publications sont des efforts de collaboration. Sur la période d'évaluation, l'expertise du réseau H+ en imagerie hydrogéophysique et sur les processus souterrains a permis de lancer des projets d'envergure au niveau international, tant sur le plan de la coordination de réseau internationaux (e.g. réseau ITN ENIGMA) que sur le développement de recherches très focalisées (e.g. projet ERC ReactiveFronts). Comme souligné par le comité scientifique international, H+ ne reste pas dans sa "zone de confort", mais explore en permanence de nouvelles questions scientifiques (par exemple les liens avec les écosystèmes, les bassins versants, la géo-microbiologie etc.), en développant des méthodes expérimentales innovantes et en partageant son expérience et ses données. Cette capacité à partager ses développements méthodologiques a contribué à faire émerger des projets structurants pour la communauté comme le projet PIA 3 Equipex + Terra Forma.

Un fort rayonnement au niveau international, dont la coordination de l'ITN Enigma est emblématique. L'equipex CRITEX, dans lequel le SNO H+ s'est fortement investi, a permis de lancer de nouveaux

développements méthodologiques sur les gaz dissous, la mesure distribuée de température par fibre optique, l'imagerie géophysique y compris l'hydrogéodésie ou encore la mesure en forage. Cet investissement a été crucial pour à la fois renouveler fortement certains thèmes de recherche mais aussi pour développer de nombreuses collaborations internationales. *In fine*, ces efforts se sont concrétisés à la fois par une reconnaissance et une visibilité nationale et internationale, dont le portage de l'ITN ENIGMA est emblématique, mais aussi par plusieurs recrutements récents au CNRS ou dans le corps des CNAP (voir ci-dessous). Enfin, durant la période d'évaluation, les équipes H+ ont été fortement investies dans l'organisation de workshop et conférences internationales, qui ont contribué au rayonnement du réseau H+. Ceci inclut en particulier l'organisation de la conférence CMWR (Computational Methods in Water Resources) à Saint-Malo en 2018 (400 participants), de la conférence Gordon « Flow and transport in permeable media » à Newry (ME, US) en 2018 (200 participants), des écoles d'été de Cargèse « Flow and transport in porous and fractured media » en 2018 et 2021 (100 participants), et la participation à de nombreuses sessions à l'EGU, l'AGU et la Near Surface Geoscience Conference 2021 à Bordeaux.

Une base de données unique, devenue référence en hydrogéophysique. Le travail effectué sur le développement de la base de données hydrogéophysique grâce au soutien de l'IR OZCAR (financement d'un IR/IE CDD depuis 2018) a permis de développer une structure unique pour gérer la diversité des données hydrogéophysiques. Ceci en fait une base de données actuellement sans équivalent dans ce domaine en terme de quantité de données, de types de données et de nombre de sites (voir section B4). Nous travaillons pour cela étroitement avec Sylvain Pasquet (IR OZCAR) et un groupe de géophysiciens impliqués dans l'IR OZCAR (Nolwenn Lesparre, Sylvain Pasquet, Ludovic Bodet, Damien Jougnot, Simon Carrière, Cédric Champollion, Roger Guérin, Christian Camerlynck, Julien Thiesson, Cyril Schamper) pour avoir un retour sur l'organisation de la base de données et les choix de format. Des échanges avec les responsables des bases de données Européennes (Campos et Tereno) et de la base de données du Berkeley Lab (Watershed Function Scientific Focus Area) ont eu lieu dans le cadre du réseau européen ENIGMA (<https://enigma-itn.eu/>). Les discussions ont mis en évidence le manque de base de données capable de gérer des données hydrogéophysiques au niveau international et l'intérêt de mutualiser les efforts dans ce domaine. La base de données H+ est la première base dédiée à ce type de données au niveau international.

Le renforcement des dispositifs d'observation sur les sites sur la période d'évaluation et des liens avec les collectivités, les partenaires locaux et industriels. L'un des points forts de la période d'évaluation a été le renforcement des dispositifs d'observation, notamment grâce à l'équipex CRITEX, au projet ITN ENIGMA et à plusieurs projets d'envergure (voir section B10 et annexe 3). Des nouvelles instrumentations ont ainsi été installées pour suivre les échanges d'eau, d'énergie et de matière entre les aquifères et les grands compartiments de la « surface » : instrumentation et suivi hydrogéophysique (sismique, ERT, gravimétrie et RMP) de la zone non saturée (Ploemeur, LSBB, Poitiers), installation de tour à flux pour les échanges avec l'atmosphère (Ploemeur, Larzac). Une nouvelle galerie a été percée au sein du LSBB fédérant plusieurs projets de recherche et d'amélioration de l'infrastructure (EQUIPEX MIGA, FEDER, Région SUD, CNRS, etc). Avant et durant le percement un important nombre des observations (géologiques, géotechniques, hydrogéologiques, sismiques, etc) ont été mis en place impliquant un grand nombre des acteurs académiques et industriels. Les initiatives entreprises lors de la période d'évaluation ont permis de développer et renforcer des grands partenariats avec des partenaires non-académiques. Ceci inclut : i) le développement de nouvelles infrastructures (ex : percement de forages sur le LSBB avec TOTAL), ii) le développement de nouvelles technologies de mesure (développement d'un nouveau gravimètre absolu basé sur une technologie quantique avec l'entreprise muQuans dans le cadre du projet ENIGMA), iii) le soutien aux suivis sur les sites (ex partenariats avec Clermont Auvergne Métropole, DREAL Auvergne-Rhône Alpes, DDT Puy de Dôme, AELB, Grand Besançon Métropole, Plan Loire Grandeur Nature, SAGE Allier Aval, Laboratoires Vichy-L'Oréal sur le site d'Auverwatch), le test et la validation in situ de nouvelles techniques de mesure (fibre optique active sur le site de Ploemeur avec SILIXA dans le cadre du projet ENIGMA, techniques de traçage avec CPGF-Horizons sur le site de Poitiers), le transfert des technologies développées sur les sites H+ vers les applications industrielles (imagerie radar des écoulements et du transport dans les

fractures avec ITASCA et SKB dans le cadre du projet ENIGMA, colmatage des forages géothermique par les biofilms avec l'entreprise ANTEA). Ces partenariats permettent aux équipes H+ de dégager des sources de financement très utiles à son fonctionnement (voir section B10), d'obtenir des résultats scientifiques fondamentaux et de transférer de nouvelles méthodes vers les applications industrielles et sociétales.

Une intégration réussie à l'IR OZCAR. Un tournant décisif a été pris en 2016 pour s'orienter, avec la mise en place d'OZCAR, vers une approche plus systémique qui permette de bien représenter le rôle des aquifères au sein du cycle hydrologique et des cycles biogéochimiques. Sur le plan scientifique, les interactions avec les autres sites du réseau OZCAR sont tout à fait naturelles. De nombreux sites du réseau OZCAR se consacrent à l'hydrologie des bassins versants et travaillent à la quantification des flux d'eau et des flux géochimiques. Pour cela, il faut tenir compte du stockage de l'eau dans la subsurface, de sa redistribution dans les bassins versants par les voies d'écoulement profondes et des processus géochimiques qui se produisent dans les aquifères. La réponse hydrologique à long terme des bassins versants au changement climatique dépend fortement du stockage dans les réservoirs souterrains. Dans une perspective à long terme, l'évolution de la surface terrestre et les processus d'altération sont liés à l'architecture des voies d'écoulement souterraines. Les collaborations sur ces questions scientifiques communes entre les équipes H+ et OZCAR sont ainsi très fertiles. Les équipes H+ se sont fortement impliquées dans le portage et l'animation des grands projets d'équipement OZCAR (CRITEX et Terra Forma). Le projet CRITEX a renforcé les collaborations entre les équipes de H+ et d'OZCAR sur le développement de techniques et de méthodologies innovantes. Par exemple, les méthodes DTS à fibre optique, développé par H+ Rennes, ont été combinées à des capteurs Molonari à bas coût pour surveiller les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines et les échanges thermiques sur les sites OZCAR de Kerrien-Kerbernez (ORE AgrHys) et d'Orgeval. Des suivis thermiques et en gaz dissous ont été mis en place sur le site de Strengbach. Des campagnes expérimentales communes, incluant les équipes de H+ et RBV, ont aussi eu lieu sur le site d'Orgeval et du Lez pour mesurer conjointement les concentrations haute fréquence des rivières en cations et anions majeurs, les gaz dissous avec le laboratoire mobile et les signaux géophysiques. Les équipes H+ fournissent également régulièrement des conseils et des outils pour développer l'instrumentation et la caractérisation du sous-sol sur les sites OZCAR. Les sites H+ ont également contribué à renforcer les collaborations entre les IR RESIF et OZCAR. En particulier, le site du Larzac accueille des observations de l'IR RESIF (Inclinométrie, GNSS, gravimétrie, sismologie) utilisées pour suivre les processus hydrogéologiques (inclinométrie et GNSS pour suivre la mise en charge des fractures, sismologie et gravimétrie pour suivre la saturation de la zone non saturée). Cette mutualisation est essentielle au fonctionnement d'un point de vue ressources humaines mais permet surtout de proposer un système d'observation unique et adapté aux particularités d'un site karstique où de nombreuses méthodes traditionnelles en forage ont une représentativité faible.

L'appui à la formation initiale et continue/par la recherche. Comme décrit dans la partie B6, tous les sites du réseau H+ sont fortement sollicités pour participer à la formation initiale et continue à travers de nombreux stages de terrain, mais aussi pour accueillir de nombreux masters et doctorants (voir annexes 3, 5 et 6) qui contribuent aux tâches d'observation et bénéficient d'excellentes conditions pour leurs travaux de recherche.

L'attractivité et le recrutement de jeunes chercheurs. Malgré la pénurie de postes actuelle, cinq recrutements de jeunes chercheurs ont eu lieu sur la période d'évaluation avec un projet en lien fort avec les sites du SNO H+ :

- Simon Carrière, hydrogéophysique, Maître de Conférence UMR METIS (2020)
- Rémi Valois, hydrogéophysique, Maître de Conférence UMR EMMAH (2020)
- Eliot Chatton, gaz dissous, Ingénieur de Recherche OSUR (2020)
- Maria Klepikova, hydrogéologie, CR CNRS UMR Géosciences Rennes (2021)
- Camille Bouchez, hydrogéologie et géochimie, physicienne adjointe CNAP OSUR (2021)

Ces jeunes chercheurs viendront renforcer des équipes fortement impliquées sur les sites du réseau H+ et de l'IR OZCAR. D'autres recrutements de MCF sont espérés dans les années à venir à Poitiers ou à Rennes.

B13. Trajectoire future

Evolution des paramètres mesurés

Tout en maintenant les suivis actuels et l'approche expérimentale en lien avec les modèles, qui est l'une des originalités de H+, la stratégie de mesure de H+ va évoluer sur plusieurs aspects dans les années à venir. Dans le cadre du renforcement des interactions avec les thématiques OZCAR, les paramètres mesurés vont également intégrer l'étude des interactions et des processus aux interfaces avec les écosystèmes de surface, ce qui nécessitera une instrumentation spécifique, telle que celle actuellement développée sur les sites de Guidel et du LSBB (dispositif des mesures écophysiologicals automatiques long termes). Ce renforcement des études interdisciplinaires conduira à la mesure conjointe de paramètres hydrologiques, géochimiques, écologiques et géophysiques, à un niveau beaucoup plus intégré que ce qui est actuellement réalisé. Cela permettra de relier les observations sur les processus de subsurface profonde à des questions scientifiques à plus grande échelle, telles que l'impact des changements globaux sur les flux et les cycles géochimiques dans la zone critique.

Ainsi, le SNO H+ va renforcer son suivi des dynamiques biogéochimiques en complément de son suivi hydrogéologique et hydrogéophysique, notamment grâce au recrutement de Camille Bouchez en tant que physicienne adjointe. En complément des tâches de service de Tanguy Le Borgne (**Figure 12**) qui seront maintenues, les nouvelles tâches de service de Camille Bouchez ont été établies en concertation avec le comité de pilotage du SNO H+ (**Figure 14**). Elles contribueront à l'intégration du SNO H+ au sein de la structure nationale OZCAR et de la structure européenne eLTER. En particulier, l'accent sera porté sur la mise en place d'un suivi biogéochimique des eaux souterraines adapté pour faire le lien avec les suivis existants dans les autres SNO du réseau OZCAR. Ceci permettra de faciliter l'intégration des données de suivi biogéochimiques des eaux souterraines dans les bases de données de la zone critique. Au-delà d'un suivi géochimique des variables essentielles, nous mettrons en place en parallèle un suivi de la composante microbiologique des aquifères et de leur rôle sur la réactivité des milieux profonds. Cette approche originale au niveau international s'appuie sur des initiatives et projets récents développés dans différents sites H+ autour de la question du rôle des microorganismes sur les réactions souterraines et leur structuration en lien avec la dynamique des écoulements. La diversité climatique et lithologique des sites offre une opportunité unique de positionner le réseau H+ au-devant de cette thématique de suivi et de recherche émergente. Nous avons chiffré le cout de ces taches d'observation et elles n'entraîneront pas un cout supplémentaire important pour le réseau. Pour la tâche 1, des plateformes existent au sein des équipes du SNO pour effectuer ces mesures, pour lesquelles C. Bouchez est formée. Pour la tâche 2, de nouveaux capteurs seront à moyen terme disponibles via le projet Terra Forma. Pour la tâche 3, le cout des analyses microbiologiques sera pris en charge par des projets en cours.

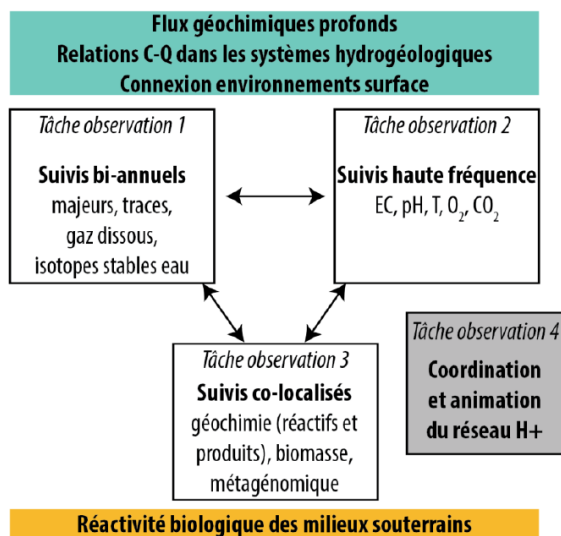


Figure 14 : Nouvelles taches de service, prises en charge par Camille Bouchez en tant que physicienne adjointe CNAP

La première tâche d'observation de Camille Bouchez consiste à mettre en place et à assurer un suivi géochimique des eaux souterraines harmonisé entre les observatoires du réseau H+. Nous étendrons pour cela au domaine souterrain les méthodes opérationnelles et existantes et les variables essentielles identifiées au sein d'OZCAR: mesure des teneurs en éléments majeurs et traces, en gaz dissous et en isotopes stables de la molécule d'eau de manière biannuelle (en hautes eaux et en basses eaux). Les prélèvements seront réalisés dans les eaux d'entrée (pluie), dans les eaux souterraines et dans les eaux d'exutoire (rivières, lacs, sources karstiques...) par les équipes des différents observatoires au cours de leurs missions biannuelles habituelles. La mesure des éléments majeurs permet de faire des bilans géochimiques et de déterminer des taux d'altération des roches dans les milieux souterrains. Les gaz dissous mesurés englobent les gaz nobles (He, Ne, Ar, Kr, Xe) indicatifs des conditions de température au moment de la recharge, les gaz réactifs (O₂, CO₂, CH₄) indicatifs des processus biogéochimiques et les gaz anthropiques (CFC, SF₆) dont la teneur est un marqueur du temps de résidence des eaux. Ces données sont devenues incontournables dans les études hydrologiques de partitionnement des flux dans les bassins versants (Jasechko, 2019⁶⁸) et sont mesurées par le SNO Renoir (pluies) et l'IR OZCAR (rivière). Les isotopes stables de l'eau apportent des informations particulièrement pertinentes lorsqu'ils sont mesurés à un pas de temps mensuel nécessaire pour suivre le cycle saisonnier des compositions isotopiques des eaux dans les différents réservoirs.

La deuxième tâche d'observation que l'on souhaite développer dans les années à venir consiste à équiper les sites de capteurs géochimiques in situ et haute fréquence. L'acquisition de données haute fréquence est la clé du suivi de la variabilité spatiale et temporelle des concentrations et donc des flux de matière dans les environnements souterrains. Pour cette tâche, nous nous appuyons sur le projet PIA3 Terra Forma qui prévoit l'acquisition de capteurs assurant un suivi à haute fréquence de variables géochimiques. Il inclut également le développement de nouveaux capteurs en réseaux mais aussi l'acquisition de capteurs in situ de dernière génération pour augmenter les fréquences spatiales et temporelles d'observation. Ainsi l'acquisition d'un nouveau parc de capteurs géochimiques in situ est prévu dès l'année prochaine qui pourront être déployés à terme dans les différents observatoires du réseau H+ afin d'acquies les premières données géochimiques à haute fréquence dans les eaux souterraines. Ces capteurs seront dans un premier temps installés sur les sites pilotes du projet Terra Forma (dont le site H+ de Ploemeur-Guidel, mais également Auradé et le col du Lautaret). Ainsi, nous prévoyons d'instrumenter les sites de capteurs de mesure multiparamètres de la conductivité électrique (la variable intégrative de la minéralisation des eaux), du pH et de la température, mais aussi de l'O₂ dissous et du CO₂ dissous. Ces deux gaz réactifs permettent un suivi de l'origine des masses d'eau et de la réactivité dans le milieu. Ils sont aussi essentiels pour le suivi de la réactivité microbiologique, puisque l'O₂ est la première source d'énergie et le CO₂ la première source de carbone utilisées par les microorganismes chimolithoautotrophe qui sont à la base des écosystèmes souterrains privés de lumière. Les méthodes optiques, développées en particulier dans le domaine océanique (Delory and Pearlman, 2018⁶⁹), ont permis récemment la mise sur le marché de capteurs d'O₂ avec des précisions inférieures à 10 nM et donc particulièrement adaptés pour le suivi de la dynamique de l'O₂ à très faible concentration qui caractérise les milieux souterrains (Larsen et al., 2016⁷⁰). Le CO₂ dissous peut être mesuré dans les environnements profonds grâce à des capteurs infrarouges non dispersifs commercialisés et au développement d'optodes (Atamanchuk et al., 2014⁷¹). A terme, les tâches d'observation 1 et 2 permettront de produire des jeux de données uniques, intégrant à la fois les mesures hydrologiques, géophysiques et géochimiques sur l'ensemble des sites.

Enfin, une nouvelle tâche d'observation vise à étendre la gamme d'observables sur les eaux souterraines pour inclure le compartiment biologique et son rôle sur la réactivité souterraine. En effet, de plus en plus

⁶⁸ Jasechko et al. *Reviews of Geophysics*, 57(3), 835-965, 2019. [DOI](#)

⁶⁹ Delory, E., & Pearlman, J. (Eds.). (2018). Elsevier.

⁷⁰ Larsen et al. *Limnology and Oceanography: Methods*, 14(12), 784-800, 2016. [DOI](#)

⁷¹ Atamanchuk et al. *Limnology and Oceanography: Methods*, 12(2), 63-73, 2014. [DOI](#)

d'étude pointent non seulement l'extraordinaire biodiversité de la subsurface continentale⁷² en lien avec le maintien d'interfaces et de déséquilibre chimiques très forts⁷³, mais aussi le rôle de ces microorganismes sur l'altération des substrats rocheux⁷⁴. Pour ces mesures geomicrobiologiques nous nous concentrerons sur trois sites : Auverwatch, Ploemeur-Guidel et le Larzac. Sur ces sites, nous co-localiserons la mesure géochimique biannuelle et à haute fréquence et en particulier les concentrations en éléments réactifs avec des mesures de biomasse et de la diversité génomique des communautés microbiennes. Ce double suivi géochimique et biologique permettra de suivre le lien entre la structuration redox des environnements souterrains et la présence et l'activité microbienne. Le site d'Auverwatch est particulièrement pertinent puisque la dégradation des polluants émergents par des communautés microbiennes dans la zone hyporhéique est au cœur de la recherche portée par cet observatoire. Sur l'aquifère silicaté de Guidel, des études récentes ont mis en évidence un écosystème basé sur l'existence de bactéries ferroxydantes de la famille des Gallionellaceae²⁶, capables de fixer le carbone inorganique dissous en oxydant le fer contenu dans les minéraux ferreux du micaschiste (biotite en particulier). De plus, la dynamique de ces communautés semble corrélée aux arrivées intermittentes d'O₂ dans le milieu via les chemins d'écoulement préférentiel depuis la surface²⁵. A l'échelle de l'aquifère, un lien très fort entre flux hydrologiques, flux biologiques et flux biogéochimiques est suggéré. Le suivi co-localisé des communautés bactériennes avec le suivi géochimique de l'O₂, du CO₂ et du fer permettra de tester cette hypothèse. Enfin, sur le site du Larzac, des études préliminaires soulèvent également le rôle des bactéries vivant dans les milieux souterrains sur les processus de karstification et donc sur les flux de calcium et de bicarbonates dans les aquifères karstiques. Le suivi co-localisé des communautés bactériennes avec le suivi géochimique du Ca²⁺, CO₂ et HCO₃⁻ permettra de tester cette hypothèse. Cette tâche d'observation assurera donc un suivi de l'activité microbienne souterraine et de sa structuration en fonction des interfaces chimiques dans les milieux poreux, en milieu sédimentaire (zone hyporhéique), cristallin et karstique. Ce suivi microbiologique dans les observatoires du réseau H+ sera particulièrement innovant et participera donc au rayonnement du réseau H+ à l'échelle internationale. Les premières études dans ce domaine sur le site de Ploemeur ont déjà donné lieu à une publication dans une revue de fort impact²⁵.

Evolution du réseau

Concernant le réseau des sites, H+ continuera à s'appuyer sur ces 5 sites principaux et son site associé piloté par le BRGM (sans financement direct H+). Des discussions très préliminaires ont été initiées avec l'UMR M2C à Rouen pour l'association d'un nouveau site hydrogéophysique, piloté par Abderrahim Jardani. Ce site en cours de création bénéficie d'un fort soutien régional et serait autonome du point de vue financier. Il est complémentaire des sites H+ actuels pour le suivi hydrogéophysique des interactions nappe-rivière. Il permettrait le développement d'échange avec une équipe très active en hydrogéophysique. L'association potentielle de ce site sera discutée avec l'ensemble des partenaires du réseau avant d'en faire la demande auprès de la CS SIC. Par ailleurs, l'une des tâches qui seront développées dans les années à venir est le transfert du savoir-faire en matière de processus et de technologies vers d'autres sites. Cela a déjà commencé avec l'organisation de campagnes de mesure sur les sites de captage d'OZCAR (par exemple, fibre optique DTS et laboratoire mobile sur Orgeval et Agrhys) et d'ENIGMA (tests de traçage avec imagerie GPR sur le site SKB en Suède, tests hydrauliques oscillants sur le site Argenton en Espagne).

Un engagement fort dans l'IR OZCAR et l'infrastructure eLTER

Le SNO H+ s'investira dans l'IR OZCAR en faisant vivre la base de données hydrogéophysiques, mais aussi en participant à l'animation scientifique et en proposant des thèmes de recherche transversaux. Le développement des interactions entre H+ et OZCAR sera l'une des tâches importantes de Camille Bouchez et Tanguy Le Borgne en tant que physiciens du CNAP (**Figure 14**). Certaines questions communes peuvent être abordées et des collaborations sont en cours entre les services d'observation H+ et Karst. Les deux structures ont leur propre pertinence, mais ces collaborations devraient être promues et renforcées dans

⁷² Bar-On et al. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(25), 6506-6511, 2018. [DOI](#)

⁷³ Kappler et al. *Geology*, 33(11), 865-868, 2005. [DOI](#)

⁷⁴ Napieralski et al. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(52), 26394-26401, 2019. [DOI](#)

un avenir proche. L'organisation d'ateliers scientifiques communs sur les eaux souterraines et les ressources en eau est actuellement discutée au sein de l'OZCAR. L'implication de H+ dans OZCAR passera aussi par des développements méthodologiques, que l'on continuera à faire et à mettre à disposition pour la communauté. En priorité, il s'agit de proposer des outils communs comme i) les gaz dissous (en particulier via le recrutement de Eliot Chatton en tant que IR à l'OSUR), ii) la fibre optique pour la mesure spatialement distribué de la température et des flux, iii) les cosmics rays pour le suivi de la teneur en eau dans la zone non saturée (équipement récemment installé sur le site du Larzac), iv) les flux de sèves et le suivi (géo)physique en écophysiologie (en cours de développement sur le LSBB et au Larzac).

Les équipes H+ sont également fortement impliquées dans la construction de l'infrastructure européenne eLTER, qui intègre les infrastructures OZCAR et RZA avec leurs équivalents Européens. Ainsi, le site du Larzac a été sélectionné comme site pilote du projet européen eLTER-plus (préfiguration de l'IR eLTER). Basé sur une sélection restreinte de sites européens, l'objectif du projet eLTER-Plus est de préfigurer le fonctionnement futur de eLTER en terme mobilité, d'accueil et de collaboration scientifique. Le site du Larzac est partenaire du projet eLTER-Plus et sera amené à accueillir des équipes européennes sur le site. Dans ce cadre, une évolution significative de l'instrumentation existante est en cours. Il a été acquis en 2019 notamment un système "cosmic rays probe" capable de mesurer en continu l'humidité des sols sur une surface significative (un disque de ~50 m de rayon). En parallèle, des mesures de flux de chaleur du sol, d'humidité et température du sol et de NDVI ont été acquises afin de boucler depuis la surface le bilan de matière (eau, CO₂) et d'énergie (température, rayonnement). L'Observatoire du Larzac évolue donc vers un système d'observation des flux de matière et d'énergie en milieu karstique méditerranéen. A ce titre, une demande de financement CPER a été réalisée afin de compléter l'Observatoire du Larzac par une mesure en continue de chimie des eaux à l'exutoire avec un "River Lab". Par ailleurs, les équipes H+ sont impliquées dans la création de plateformes régionales intégrant les observatoires OZCAR et RZA. C'est le cas en Bretagne, où un projet d'observatoire interdisciplinaire des milieux continentaux est proposé par l'Université de Rennes. Ce cluster comprendrait le site de Ploemeur H+, les sites du bassin versant d'Agrhys et les sites de la ZA Armorique et ZA Brest Iroise, développés par la communauté d'écologie et de sociologie. Ce projet est financé par le CPER de la région Bretagne et a l'ambition de guider la région dans ses transitions socio-environnementales. Ce modèle de clusters régionaux, similaire à l'organisation de TERENO en Allemagne, peut être une stratégie pour développer des actions interdisciplinaires au sein d'OZCAR, tout en maintenant les sites. Ces clusters peuvent remplir les conditions nécessaires en termes de paramètres mesurés pour devenir des plateformes eLTER.

L'intensification des réseaux de mesure avec le projet Terra Forma

Enfin les équipes H+ ont été à l'origine, avec d'autres partenaires en France, du projet PIA3 Terra Forma. Ce projet vise à concevoir et tester des observatoires *in-situ* apportant une nouvelle vision multi-messagers sur les dynamiques humaine, biotique et abiotique. Il s'appuie sur les dernières avancées technologiques (capteurs optiques, impression 3D, Internet des objets, intelligence artificielle) pour concevoir et tester un réseau évolutif de capteurs intelligents. Les équipes H+ sont fortement impliquées dans le portage du projet (PI Laurent Longuevergne) et dans plusieurs work-packages de développement instrumentaux. En particulier, les équipes H+ participeront au développement et à l'installation de capteurs de type « lab on a chip » basés sur l'utilisation de puces microfluidiques intégrant des micro-capteurs (Martinez-Cisneros et al., 2018⁷⁵) et des dispositifs de micro-prélèvement des fluides (Wurzbacher et al., 2012⁷⁶). Ces technologies sont aujourd'hui de plus en plus utilisées dans les études océanographiques (Delory and Pearlman, 2018⁶⁹) mais doivent être adaptés pour répondre aux enjeux propres aux environnements souterrains. Ces méthodes innovantes permettent théoriquement de mesurer une large gamme d'éléments chimiques incluant les nitrates, le fer, la silice et même l'adénosine triphosphate qui est un marqueur de l'activité biologique. Le site de Ploemeur a été sélectionné comme site pilote du projet pour démontrer le concept de réseaux de capteurs, qui auront vocation à être déployé par la suite sur les autres sites par la suite. Ce projet sera ainsi très important dans l'évolution de l'instrumentation des sites du réseau H+.

⁷⁵ Martinez-Cisneros et al. *Lab on a Chip*, 18(13), 1884-1890, 2018. [DOI](#)

⁷⁶ Wurzbacher et al. *Environmental science & technology*, 46(16), 9191-9198, 2012. [DOI](#)

Evolution des ressources humaines

Le réseau H+ bénéficie de renforts importants en jeune chercheurs, avec en particulier le recrutement de Camille Bouchez en tant que physicienne adjointe CNAP (voir section B12). Ce recrutement permettra d'assurer un suivi biogéochimique des eaux souterraines harmonisé sur l'ensemble des sites du SNO H+ et de renforcer les interactions entre H+, OZCAR et eLTER (voir ci-dessus). Le SNO H+ incitera les jeunes chercheurs recrutés à s'investir sur les sites du réseau pour leurs projets de recherche. La priorité de recrutement CNAP dans les prochaines années sera le recrutement d'un physicien adjoint en hydrogéophysique pour consolider les activités de suivi, d'expérimentation et d'archivage des données dans ce domaine, l'une des forces du réseau H+. Plusieurs demandes d'ITA sont en cours (voir annexe 2) pour renforcer le soutien technique sur les sites. Elles sont inscrites dans les priorités des structures hôtes et la direction du SNO H+ travaillera avec les responsables de sites et de ces structures pour les faire aboutir.

Evolution de la base de données

Durant la prochaine période de labellisation, nous poursuivrons les interactions en cours entre les gestionnaires de données, les producteurs de données et les utilisateurs de données afin d'intégrer les nouveaux types de données qui apparaissent avec le développement de nouvelles technologies de détection et d'analyse. Les nouveaux formats de données récemment développés pour la base de données H+ comprennent notamment les mesures DTS par fibre optique. Par ailleurs, un objectif important pour les années à venir est d'améliorer l'accessibilité et l'utilisation des données H+. La création de DOIs associés aux ensembles de données H+ qui peuvent être associés à des publications utilisant des données H+ contribuera à cet objectif. Ces DOI seront liés à des requêtes de base de données prédéfinies et répertoriés sur la page web de chaque site. L'intégration d'OZCAR dans l'infrastructure européenne eLTER a donné lieu à des échanges concernant la pertinence de la mesure de différents paramètres. Les discussions en cours portent sur une série de paramètres communs qui devraient être mesurés sur chacun des sites eLTER. Ce type de stratégie de suivi, qui rappelle ce qui se fait sur d'autres infrastructures européennes établies telles que ICOS, n'est pas nécessairement compatible avec la philosophie de H+ qui est axée sur l'expérimentation et le test de modèles, autant que sur le suivi des changements à long terme. Par conséquent, l'un des défis de l'intégration dans eLTER sera de trouver une approche commune de mesure et d'archivage des données, compatible avec les stratégies expérimentales et de suivi développées par les différentes communautés.

Avez-vous identifié des challenges majeurs qui vous mobilisent pour l'avenir et éventuellement des risques associés ?

Les questions de H+ restent des domaines de recherche très actifs et les sites H+ continueront à contribuer à la fourniture de données de terrain et à développer des approches expérimentales innovantes pour comprendre et quantifier le rôle de l'hétérogénéité sur les processus d'écoulement, le transport de solutés ou de chaleur, la réactivité biogéochimique où encore sur les interactions hydromécaniques. La prospective scientifique de chaque site montre que des objectifs spécifiques sont définis pour chaque site:

- **Site de Ploemeur/Guidel** : quantifier les interactions entre les milieux souterrains et superficiels en étudiant l'impact hydrologique, géochimique et écologique de la création d'un nouveau site de captage d'eau souterraine.
- **Site du Larzac** : élargir la gamme des méthodes géophysiques pour étudier les processus de la zone vadose dans les systèmes karstiques, des méthodes de géodésie à la sismologie passive, aux méthodes électriques.
- **Site de Poitiers** : quantifier l'impact de l'hétérogénéité karstique sur les processus de transport.
- **Site du LSBB** : profiter du forage d'une nouvelle galerie et de nouveaux forages pour étudier le rôle des structures géologiques sur le comportement hydrodynamique du système karstique non saturé.
- **Site d'Auverwatch** : étudier le devenir et la réactivité des molécules émergentes en couplant le développement de capteurs chimiques et l'utilisation de nouvelles molécules comme traceurs avec des méthodes hydrogéologiques, telles que les DTS à fibres optiques actives, en collaboration avec les équipes de H+.

- **Site d'Hyderabad** : utiliser la compréhension de la connectivité hydraulique, des processus de transport hydrochimique et de la dynamique d'écoulement des eaux souterraines obtenue à l'échelle du site expérimental pour étudier l'impact de la durabilité des ressources en eaux souterraines à plus grande échelle dans le contexte des aquifères cristallins en climat semi-aride.

En plus de ces initiatives et projets sur chaque site, il serait utile de synthétiser les observations faites sur différents sites sur une question spécifique. Par exemple, entre les sites de Poitiers, Ploemeur et Hyderabad, le réseau H+ fournit maintenant une base de données unique de tests de traceurs dans différents contextes hydrogéologiques. Bien que l'interprétation de ces tests ait fait l'objet d'articles individuels, il serait intéressant de discuter des leçons que l'on pourrait tirer en comparant les comportements de transport sur ces différents sites. La base de données d'essais de traçage correspondante serait également utile à la communauté pour tester les hypothèses de modélisation. Il existe clairement des opportunités similaires pour d'autres sujets, comme le couplage hydro-mécanique (Ploemeur, LSBB, Larzac) ou la recharge (Ploemeur, Larzac, Hyderabad, LSBB).

Dans ce qui suit, nous détaillons quelques-uns des sujets scientifiques emblématiques qui guideront les recherches futures sur les sites H+.

Processus de transport et biogéochimie. L'une des principales questions scientifiques qui sera abordée dans les années à venir est d'élucider et de quantifier le lien entre l'hétérogénéité spatiale et l'intermittence des flux hydrologiques et les modèles et les taux de réactivité des processus biogéochimiques. Les flux hydrologiques soutiennent des taux de réaction élevés en fournissant les réactifs manquants pour les réactions fluide-fluide ou fluide-minéral, et les nutriments pour les micro-organismes. Des hot spots biogéochimiques réactifs se forment souvent à l'intersection des voies d'écoulement hydrologiques, où la confluence de réactifs complémentaires favorise une activité biogéochimique qui peut influencer de manière disproportionnée les taux de production à grande échelle. Comprendre où et quand ces hot spots se forment est donc essentiel pour modéliser les processus biogéochimiques dans les systèmes hydrologiques. Les réactions présentant un intérêt particulier comprennent les réactions d'oxydoréduction qui contrôlent le cycle des principaux éléments chimiques, tels que l'azote, le carbone et le fer, les processus de dissolution/précipitation, qui peuvent créer ou réduire la porosité et contrôler les flux d'altération, et les réactions d'adsorption/complexation qui jouent un rôle important dans le transport et la dégradation des contaminants. Tous ces processus réactifs interagissent aussi fortement avec l'organisation, la biodiversité et les fonctions des communautés microbiennes de subsurface, ce qui représente l'une des frontières actuelles de la science. Des découvertes récentes sur les sites H+ ont montré que les hot spots microbiens induits par les fractures peuvent se produire sur une large zone réactive qui s'étend sur des centaines de mètres sous la surface (Bochet et al. 2020²⁵).

Les questions qui seront abordées grâce aux observations de terrain sur les sites H+ sont les suivantes : Quels sont les schémas spatiaux et la dynamique temporelle des hot spots réactifs ? Quel est le rôle des hot spots biogéochimiques dans les interfaces de mélange telles que la zone hyporhéique dans le contrôle de la concentration et des flux d'éléments chimiques ? Quels sont les modèles conceptuels appropriés pour quantifier l'impact des hot spots réactifs sur les taux de réaction effectifs ? Comment les communautés microbiennes interagissent-elles avec les minéraux ? Comment réagissent-elles aux cycles hydrologiques saisonniers ? Les équipes de H+ ont commencé à apporter de nouvelles contraintes à ces questions en couplant des approches expérimentales et de surveillance. Des collaborations sont activement développées avec des géochimistes (K. Maher, Stanford, J. Druhan, Université du Wisconsin, L. Ma, Université du Texas, J. Gaillardet, IPGP) et des spécialistes des processus microbiens (A. Dufresne, Ecobio, B. Ménez, IPGP). La diversité des sites expérimentaux H+, avec des voies d'écoulement et des propriétés de transport très bien caractérisées, offre une opportunité scientifique d'explorer les schémas spatiaux et la dynamique temporelle des processus réactifs et microbiens couplés. Les principaux défis seront de relier les observations microscopiques en laboratoire aux processus sur le terrain, de définir des espèces modèles pour les microbes des eaux souterraines, de développer des traceurs intelligents, qui peuvent être des indicateurs des processus réactifs et microbiens (par exemple, des gaz dissous ou des colorants

fluorescents) et de comprendre quelles sont les propriétés génériques et spécifiques au site des communautés microbiennes.

Interactions entre les environnements de subsurface et de surface dans la zone critique. Les interactions entre les environnements de subsurface et de surface sont l'une des questions émergentes du réseau H+. Ceci est cohérent avec l'amélioration de l'intégration des approches interdisciplinaires développées dans l'infrastructure OZCAR. Les principales questions sont "comment l'écoulement des eaux souterraines façonne-t-il les écosystèmes ?" et "quel est l'impact des pressions anthropiques et climatiques sur les systèmes d'eaux souterraines ?". Depuis 2016, un nouveau suivi interdisciplinaire a été développé sur le site de Guidel (situé à proximité de Ploemeur dans un contexte géologique et des forçages climatiques similaires), pour étudier l'impact hydrologique, biogéochimique et écologique du développement d'un nouveau site de captage d'eau souterraine. Les eaux souterraines profondes remontent naturellement, alimentant un écosystème dépendant des eaux souterraines avec de grandes quantités d'eau chaude et riche en fer. La nouvelle station de pompage municipale sera mise en service en 2022, ce qui permettra d'abord de capter les eaux profondes, de renforcer la réactivité et de modifier complètement l'écoulement de l'eau entre les différents compartiments hydrologiques. Cela peut être considéré comme une expérience à grande échelle et à long terme, à des échelles de temps allant du jour/mois pour le débit à l'année/décennie pour la qualité de l'eau et le transfert de chaleur. Les mesures interdisciplinaires prévues sur le site comprennent : (a) à l'échelle 10-m, un réseau de 6 forages peu profonds, un suivi continu de la polarisation induite, une tour à flux pour étudier l'évolution des échanges verticaux profondeur-surface, des relevés répétés de l'hydrochimie, de la production de gaz, de la structure des communautés microbiennes à partir de l'ADN, des patrons de végétation, ERT et profils sismiques, pour explorer les processus et les spatialiser (b) à l'échelle du système, l'eau pompée et le débit/hydrochimie des rivières, la déformation et l'évolution en aval d'un écosystème Natura2000 pour saisir l'impact du pompage à plus grande échelle, y compris dans les zones situées en dehors du bassin versant topographique.

D'autres initiatives visant à étudier le lien entre l'écoulement et le transport souterrains et d'autres processus sont en cours en collaboration avec les équipes d'OZCAR. L'utilisation de la chaleur comme traceur des eaux souterraines est particulièrement bien adaptée à un grand nombre d'applications. Il est intéressant de noter qu'il est maintenant possible de surveiller et de quantifier les processus d'écoulement intermittents à haute fréquence par des mesures de température de haute précision, non seulement dans la zone hyporhéique à quelques mètres de profondeur, mais aussi dans les aquifères fracturés ou karstiques, à des profondeurs beaucoup plus importantes. Le futur défi sera de comprendre comment ces changements intermittents de température peuvent être utilisés pour caractériser les processus d'écoulement, les mélanges et les réactions qui se produisent dans la zone critique supérieure. Une gamme complète d'outils de mesure complémentaires est désormais disponible pour les mesures de température. Des mesures de flux de sève ont été installées en 2021 sur le site du LSBB (porteur : S. Carrière) sur différentes espèces présentes : pin noir d'Autriche, chêne pubescent, buis. L'objectif dans une approche typique d'eLTER est de faire le lien entre les suivis géophysiques de précision (en gravimétrie, l'attraction d'un pack de 6 bouteilles d'eau 1.5 l est mesurable à 1 m!) et la dynamique de la végétation de surface (évaporation, humidité du sol). Ce lien géophysique - écophysiologie est riche en potentialité sur le couplage biotique – abiotique : fermeture des espaces liés à l'abandon du parcours des brebis et recharge des hydrosystèmes, changement climatique et modification de la biodiversité végétale, impact des parasites comme la Pyrale du Buis sur la végétation et donc la recharge, ... C'est une action long-terme, impliquant une structuration locale entre l'INRAE, INEE et INSU sur les sites du LSBB et du Larzac.

Interactions entre changements globaux et processus de subsurface. L'étude et le suivi à long terme des interactions entre le changement climatique et les processus de subsurface est un sujet scientifique émergent pour les équipes de H+, qui sera développé davantage grâce aux interactions avec la communauté OZCAR. Les questions clés sont les suivantes : i) Comment la subsurface atténue-t-elle l'impact du climat

sur les ressources en eau⁷⁷ ? ii) Comment la redistribution de l'eau par l'écoulement latéral de subsurface a-t-elle un impact sur les processus climatiques et de surface⁷⁸? iii) Comment cette redistribution est-elle affectée par les hétérogénéités de subsurface ? iv) Quelle est la contribution des processus réactifs de subsurface dans les bilans des gaz à effet de serre, tels que le CO₂ et le N₂O⁷⁹ ? v) Comment prendre en compte les processus de subsurface dans les modèles de surface terrestre / climat ? Comme souligné par Taylor et al. (2013)⁷⁷, " le manque actuel d'observations sur les eaux souterraines limite notre compréhension de la relation dynamique entre les eaux souterraines et le climat ". Les équipes de H+ ont la possibilité de fournir de nouvelles informations sur ces questions grâce à la surveillance à long terme de variables clés telles que la recharge et la température sur les sites de H+, les liens développés entre les données et les modèles, la compréhension du rôle des hétérogénéités de subsurface sur les flux et les processus réactifs, et les nouvelles interactions développées par la communauté OZCAR. L'un des principaux défis à relever est la grande séparation des échelles des mesures et des modèles climatiques. Certaines études ont abordé cette question en exportant les concepts hydrologiques développés sur les sites H+ à une plus grande échelle (Ferrant et al. 2014⁸⁰). Des collaborations avec des modélisateurs de surface terrestre / climat à grande échelle (Yoshi Wada) ont été entamées pour intégrer les flux latéraux de subsurface dans les modèles à grande échelle.

Imagerie hydrogéophysique des processus dynamiques. Les études méthodologiques des équipes H+ se concentrent sur trois méthodes principales. 1) **Les méthodes sismiques (passives et actives)** peuvent être utilisées en time-lapse ou avec une haute résolution spatiale et sont donc bien adaptées à la caractérisation de milieux hétérogènes (karst, aquifères fracturés). Les mesures sismiques des vitesses d'ondes sont sensibles à la fois à la teneur en eau et aux propriétés de la roche (lithologie, fractures, ...). Pour déconvoluer la teneur en eau à partir de la structure du sol, la sismique active utilise les ondes P et S⁸¹. D'autre part, la sismique passive basée sur la corrélation du bruit est principalement sensible aux variations de vitesse des ondes dues aux variations de la teneur en eau souterraine. Mais dans les deux cas, la relation quantitative doit être clairement établie. Les premières expériences de terrain ont été testées sur les sites du Larzac⁸² et de Ploemeur (aquifères discontinus) ainsi que sur le site d'Orgeval dans un aquifère continu et peu profond (dans le cadre des programmes CRITEX et PIREN-Seine). 2) **Les mesures électriques (actives et passives).** La tomographie de résistivité électrique (ERT) est l'une des méthodes géophysiques actives les plus utilisées. Cependant, les méthodes d'inversion ont tendance à lisser considérablement les hétérogénéités du sous-sol. Un des objectifs des équipes H+ est le développement de nouveaux principes d'inversion basés sur les réseaux de fractures avec une représentation explicite des fractures afin de prendre en compte les contrastes de résistivité élevés avec moins de paramètres. 3) Pour certaines méthodes géophysiques telles que **la gravité, la SRM ou la tomographie à muons**, la relation entre les changements de signal et la teneur en eau est bien établie avec des études réussies dans différents sites H+. Mais les gravimètres absolus ou les capteurs à muons actuels sont encore difficiles à déployer sur le terrain. Les équipes H+, en collaboration avec des partenaires industriels, travaillent au développement de nouveaux capteurs portables. Une collaboration avec l'IR RESIF, l'ITN et la société muQuans vise par exemple à valider un nouveau capteur de gravité absolue quantique bien adapté à la surveillance des réservoirs⁸³. La collaboration autour des développements instrumentaux en gravimétrie quantique doit permettre de fournir à la communauté scientifique des capteurs adaptés à l'étude de la zone critique. En parallèle, des travaux continuent sur l'inclinométrie et son adaptation en forages. Des sondes de mesure du potentiel spontané électrique (PS) ou des mesures d'humidité par « Cosmics Ray » sont en cours de mise en œuvre sur le site du Larzac pour suivre la teneur en eau dans les sols et les processus de recharge.

⁷⁷ Taylor et al. *Nature climate change*, 3(4), 322-329, 2013. [DOI](#)

⁷⁸ Maxwell et al. *Geophysical Research Letters*, 43(2), 701-708. [DOI](#)

⁷⁹ Marzadri et al. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(17), 4330-4335. [DOI](#)

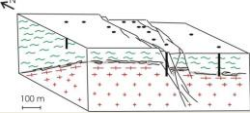

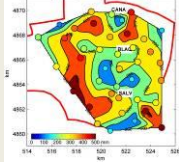

⁸⁰ Ferrant et al. *Scientific reports*, 4(1), 1-10, 2014. [DOI](#)



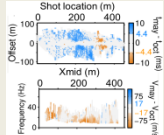
⁸¹ Pasquet et al. *Geophysics*, 82(6), WB47-WB61, 2017. [DOI](#)

⁸² Fores et al. *Vadose Zone Journal*, 17(1):170163, 2018. [DOI](#)

⁸³ Ménoret et al. *Scientific reports*, 8(1), 1-11, 2018. [DOI](#)

Annexe 1 description synthétique des sites H+

H+ component	Ploemeur / GUIDEL (France)	S.E.H. Poitiers (France)	Durzon, Larzac (France)	LSBB (France)
Scientists in charge	Laurent Longuevergne (Rennes)	Gilles Porel (Poitiers)	Cédric Champollion (Montpellier)	K. Chalikakis (Avignon)
MAIN SCIENTIFIC TOPICS	Experimental and long term monitoring platform for fractured ROCK PROCESSES	ADAPTED WELL ARRANGEMENT FOR EXPERIMENTS AND MODELLING	CAPACITIVE BEHAVIOR OF A KARSTIC AQUIFER	LARGE SCALE TUNNEL FACILITIES WITHIN THE UNSATURATED ZONE OF A STRATEGIC FRENCH KARST AQUIFER
Aquifer type	fractured, weathered crystalline rocks 	Fractured, karstified limestone aquifer 	karstic carbonates 	Fractured, karstified carbonates 
Characteristics	3 sub-sites, 10 km ² , 60 wells (30-150 m depth), 6 shallow (2-10m), 2 cored boreholes. Ground instrumentation : GPS, tiltmeters, sismometer .flux tower, discharge station ..	Size: 40000 m ² , In-situ instrumentation: 35 wells (125 m depth), 2 vertical cored boreholes, 2 oblique cored boreholes.	100 km ² , In-situ instrumentation: tiltmeters, flowmeters, gravimeters, infiltration	3.8 km of underground tunnel, 12 000m ² , 60 temporary and 4 permanent flow points (30-500 m depth) Ground instrumentation : GPS, tiltmeter, ismometer,
Specific interest	Experimental site, dual natural/pumped system. Strong signal and fast flow due to groundwater abstraction, GW dependent ecosystem. Long term evolution, after 25 years of pumping the system has not reached equilibrium.	Dense and regular borehole grid, Possibility to test and validate groundwater flow and transport models, Biochemical reactivity with in-situ experiments	Hydrogeodetic instrumentation (gravimetry, tilt) geophysical imagery of structures and water content, vadose zone investigation, water budget closure	Direct access inside the Unsaturated Zone of a karst aquifer. Detailed characterization of structure, fluxes and chemistry in the unsaturated zone. Long term monitoring of fluxes and chemistry
Monitoring	Hydrology: piezometric levels, pumping flow rate, flux tower, discharge station, meteorology chemistry : major ions and traces, water ages with CFC, isotopes, Radon geophysics :GPS, tiltmeter, sismic, IP-vertical profile	Hydrology: piezometric levels, groundwater temperature, climatic variables	Hydrology : Pluviometry, Spring discharge Flow meter and infiltration as a function of depth, EVT measurement (2011) Geodesy : long base tiltmetry, SG gravimetry	Hydrology : rainfall, flow rates, physical parameters Hydrochemistry : major ions ; Total Organic carbon, isotopes Geophysics : seismic, electric, electromagnetic, gravimetry, and magnetometry
Experimentation	Pumping tests, flowmeter tests, ground surface deformation response to pumping and sinusoidal tests, tracer tests (heat, solute): dipole and reactive push pull, time lapse geophysical imagery	Borehole flowmeter tests, imagery, and geophysics, Monopole and dipole pumping tests, Single- and cross-borehole slug tests, 3D seismic imaging, Tracer tests.	MRS, electric imagery, Absolute gravity, relative gravity network, surface to depth gravity	System dynamics under constraint Geophysical imagery methodological and instrumental development
Modeling	3D aquifer model, effective model for pressure diffusion, inverse modeling of radar data and DFN model conditioning, hydro-mechanical model	Benchmark of flow and transport models (2D/3D, EPM/DFN, forward/inverse) against experimental field data.	Inverse modeling of gravity and seismic time series using local reservoir models of the vadose zone	3D to 4D karst aquifer model development
Link to data	http://hplus.ore.fr/en/ploemeur/data-ploemeur	http://hplus.ore.fr/en/poitiers/data-poitiers	http://hplus.ore.fr/en/larzac/data-larzac	http://hplus.ore.fr/en/lsbb/data-lsbb
Deliverables, and associated tasks	Methods for characterizing flow heterogeneity, modeling approaches for fractured media, chemical reactivity in relation to pumping, distribution of residence and transfer times, aquifer vulnerability to climatic and anthropic changes, GW role in Critical Zone	Development of new methods for the characterization of multi-porosity aquifers, Hydraulic and geometric characterization of high-permeability flow paths, Coupled inverse modelling using flow, tracer and seismic data.	time gravity series associated to capacitive function of the aquifer vertical and horizontal quantification storage variation, hydromechanical behavior associated to water storage in the vadose zone aquifer storage variation over decadal periods	Bimensuel hydrodynamic and hydrochemical data. Petrophysical characterisation , Different time and spatial scales hydrogeophysical approaches.

H+ component	Auverwatch (France)	Hyderabad (Inde)	METIS team (France)
Scientists in charge	H. Celle-Jeanton (Besançon)	J.C. Maréchal (Montpellier)	L. Bodet (METIS)
MAIN SCIENTIFIC TOPICS	MONITORING OF REACTIVE PROCESSES IN RIVER - ALLUVIAL AQUIFER SYSTEM	TROPICAL FRACTURED AQUIFER UNDER OVEREXPLOITATION	NEAR-SURFACE GEOPHYSICAL METHODS
Aquifer type	Alluvial, sedimentary 	Fractured, weathered crystalline rocks 	All types of aquifer 
Characteristics	2 rain gauges, one pumping borehole, 1 observation piezometer	Choutuppal (43km ² , 26 piezometers (14-60 m depth) Maheshwaram (55 km ² , 150 piezometers (15-100m depth)	Various geophysical methods and approaches (mapping, sounding, imaging) – various scales of interest (10 cm to 100 m)
Specific interest	Investigations on reactive transport processes in alluvial hydro-system in relation to surface/ groundwater mixing Long-term evolution of water level and chemistry of a exploited aquifer	Long term evolution of piezometry and chemistry in response to overexploitation, climatic and anthropogenic changes Long term collaboration with National Geophysical Research Institute	Development of geophysical methods (active seismic, electrical resistivity, polarization, EM) for the imaging of the Critical Zone spatial and temporal heterogeneities (acquisition techniques, processing and inversion workflows)
Monitoring	Hydrology : rainfall height, river height, piezometric levels Chemistry : major and trace ions, isotopes, phytosanitaires, pharmaceuticals, microbiology: pathogen bacteria	Hydrology: piezometric levels, pumping flow rate, climatic variables Chemistry : major ions and traces, isotopes Geophysics : electrical resistivity tomography Landuse change	Time-lapse at acquisitions of geophysical data (seismic and electrical resistivity tomography, EM mapping etc.) at different time scales
Experimentation	Hydrogeophysic (ERT), in situ permeability tests, borehole logs, coupling measurements of contaminant concentrations and groundwater flows quantified by Fiber optic distribute temperature sensing method	pumping tests, flowmeter tests, tracer tests, time lapse geophysical imagery, artificial recharge, monitoring of recharge	Scaled multi-method geophysical experiments and surveys. Simultaneous acquisitions of complementary geophysical variables
Modeling	Conceptual model of the hydrosystems	2D regional groundwater flow modeling 1D geochemical modeling of water-rock interactions	Development of alternative forward models to be implemented in geophysical inversion tools
Link to data	http://hplus.ore.fr/en/auverwatch-en/data-auverwatch http://opgc.fr/vobs/so_interface.php?so=auverwatch	http://hplus.ore.fr/en/india/data-india-choutuppal and http://hplus.ore.fr/en/india/data-india-maheshwaram	
Deliverables, date and associated tasks	Monthly hydrodynamic and hydrochemical data. Origin and characterization of water in an alluvial system (focus on surface/groundwater mixing). Chemical reactivity in relation to pumping	Heterogeneity of weathering profile at catchment scale Relationships between hydrodynamic characteristics and transport parameters Origin and fate of geogenic contaminants, Water quality vulnerability to anthropic and climate change.	Develop new approaches to go from structural and static property imaging to process-based imaging approaches

Annexe 2 : implication des personnels dans le SNO (hors exploitation scientifique)

Le tableau ci-dessous présente l'implication des personnes dans le SNO (hors exploitation scientifique). L'implication des personnels des équipes et sites associés (METIS et Hyderabad) n'est pas détaillée dans ce tableau.

NOM Prénom	Employeur, affiliation, corps	Rôle dans le SNO	pm/an	Ressource existante ou demandée
Réseau				
Bour Olivier	UR1, Géosciences Rennes UMR 6118, PR	Directeur scientifique	1	Existante
Champollion Cédric	UM, UMR Géosciences Montpellier, MCF	Directeur adjoint	0.5	Existante
Le Borgne Tanguy	CNAP SCOA, UMS OSUR, Phys.	Directeur adjoint et coordination des activités en hydrogéologie	4	Existante
Bouchez Camille	CNRS, UMR 6118, post-doc 2018-2021 puis CNAP SCOA, UMS OSUR, Phys. Adjoint	Coordination des activités en géochimie	4	Existante (prise de fonction prévue en Septembre 2021)
Battais Annick	CNRS, UMR 6118, IE	Gestion et développement de la base de données H+	2,5	Existante
Kenshilikova Meruyert	CNRS, UMS OSUR, IE	Coordination de la base de données hydrogéophysique pour les sites OZCAR	12	CDD OZCAR depuis 2018
Nogues Sandrine	CNRS, UMS OSUR, AI	Gestion administrative du réseau	1	Existante
Ploemeur				
Longuevergne Laurent	CNRS, UMR 6118, DR	Coordination scientifique site Ploemeur, développement du site de Guidel	2	Existante
Chatton Eliot	CNRS, UMS OSUR, IR	Coordination scientifique du site de Ploemeur	2	Existante
Lavenant Nicolas	CNRS, UMR 6118, AI (passage IE en 2021)	Coordination technique du site Ploemeur responsable des inclinomètres et équipements CRITEX	4	Existante
Francesco Gomez	CNRS, UMR 6118, IE	Développement instrumentaux et participation au suivi	1	Existante
Labasque Thierry	CNRS, UMR 6118, IR	Développements gaz dissous, suivi géochimique	1	Existante
Camille Bouchez	CNRS, UMR 6118, post-doc 2018-2021 puis CNAP SCOA, UMS OSUR, Phys. Adjoint	Suivis hydrochimiques, expérimentation sur site	1	Existante (prise de fonction prévue en Septembre 2021)

Le Borgne Tanguy	CNAP SCOA, UMS OSUR, Phys.	Accompagnement expérimentations	1	Existante
Maria Klepikova	CNRS, UMR 6118, CR	Suivis température eaux profondes	1	Existante (permanente depuis 2021)
Bour Olivier	UR1, UMR 6118, PR	Accompagnement hydrogéologie	1	Existante
Technicien terrain	CNRS, UMS OSUR	Soutien aux activités de terrain	6	Demandée
Assistant ingénieur réseau de capteur	UR1, UMS OSUR	Développement de réseaux de capteurs en lien avec Terra Forma	4	Demandée
Ingénieur de recherche en microbiologie	CNRS, UMS OSUR	Développement de nouvelles techniques pour l'étude des ecosystèmes profonds	4	Demandée
Auverwatch				
Hélène CELLE- JEANTON	UBFC, Chrono- Environnement/OPGC, PR	Coordinatrice Auverwatch	2	Existante
Gilles MAILHOT	CNRS, ICCF/OPGC, DR	Co-Coordinateur Auverwatch	1	Existante
Jean-Luc DEVIDAL	UCA, LMV, IE	Coordination technique, observations	1	Existante
Yannick GUEHENNEUX	UCA, OPGC, IE	Gestion base de données	0,5	Existante
Alexandre FAISSAL	UCA, OPGC, AJT	Gestion logistique	0,5	Existante
LSBB				
CHALIKAKIS Konstantinos	AU – UMR EMMAH, MCF	Coordinateur site LSBB pour le SNO H+, Resp. instrumentation hyrogéophysique	2	Existante
MAZZILLI Naomi	AU – UMR EMMAH, MCF	Resp. instrumentation hydrodynamique	1	Existante
EMBLANCH Christophe	AU – UMR EMMAH, MCF	Resp. instrumentation hydrochimique	1	Existante
VALOIS Remi	AU – UMR EMMAH, MCF (recturé en sept. 2020)	Instrumentation et suivi hydrogéophysique	1	Existante (prise de fonction en 2021)
BABIC Milanka	AU – UMR EMMAH, Ing.	Analyses hydrochimiques	0.1	Existante
SIMLER Roland	AU – UMR EMMAH, Ing.	Analyses hydrochimiques	0.3	Existante
DECITRE Jean- Baptiste	CNRS, UMS LSBB, Ing.	Instrumentation et automatisation des mesures	0.2	Existante
CAVAILLOU Alain	CNRS, UMS LSBB, Ing.	Informatique	0.1	Existante
BOYER Daniel	CNRS, UMS LSBB, Ing., Dir- adj.	Instrumentation et logistique	0.1	Existante
AUGUSTE Michel	Contractuel	Echantillonnage	1	Existante
BLANC Matthieu	Contractuel	Echantillonnage	3	Existante
Poitiers				

POREL Gilles	MCF – UMR 7285 IC2MP	Coordinateur du site	6	Existante
NAULEAU Benoît	IE-CNRS – UMR 7285 IC2MP	Capteurs Base de données Logiciels spécifiques Logistique	11	Existante
PAQUET Denis	AI-CNRS – UMR 7285 IC2MP	Matériel roulant Electricité Entretien	6	Existante (départ retraite juin 2022)
Larzac				
Champollion Cédric	UM, UMR Géosciences Montpellier, MCF	Coordinateur site Larzac pour le SNO H+ et OZCAR et eLTER	4	Existante
Le Moigne Nicolas	CNRS, UMR Géosciences Montpellier, IR	Resp. instrumentation gravimétrie	3	Existante
Sandrine Baudin	UM, UMR Géosciences, IE	Resp. instrumentation sismologie et GPS	1	Existante
Doerflinger Eric	CNRS, UMR Géosciences, IR	Resp. instrumentation pluvio et débit souterrains	1	Existante
De Montety Véronique	UM, UMR Géosciences, MdC	Analyses hydrochimiques	2	Existante
Jean Chéry	CNRS, UMR Géosciences, DR	Mesures souterraines et instrumentations en forages	1	Existante
Physicien adjoint CNAP	CNAP, OSU OREME, UM	Gestion du site et des équipements (notamment de la tour de flux et des gravimètres). Coordinateur des demandes eLTER et OZCAR	4	Demandée

Annexe 3 Détails des budgets par site

Ressources récurrentes et occasionnelles du SNO sur la période 2017-2021

Ressources récurrentes sur 2017-2021			Ressources occasionnelles sur 2017-2021		
Origine	Montant (k€)	Commentaire	Origine	Montant (k€)	Commentaire
Réseau					
SNO H+	30	Rencontres H+, informatique base de données, échanges avec équipes associées	Appel à projet CRITEX	45	High frequency temperature monitoring as a groundwater tracer of flow and biogeochemical reactions in the critical zone
SOERE et OZCAR	220	CDD base de données hydrogéophysique pour les sites OZCAR	Appel à projet CRITEX	30	Water chemistry monitoring for hot-spots and hot-moments characterization in the Critical Zone
			Appel à projet CRITEX	20	Towards quantitative critical zone monitoring with passive geophysical methods
TOTAL	250			95	
Ploemeur					
SNO H+	35		UR1	7	Défis Scientifiques 2017
			PIA - AO CRITEX (T2)	30	PI Camille Bouchez, actions sur Ploemeur, la Guadeloupe et le site du Lez
			CNRS - MITI PRIME80	146	Doctorat E. Ganivet + fonctionnement (2020-2022)
!			EU ITN Enigma	300	Doctorat L. Blazevic et B. Pouladi + expérimentation
			Projet ERC ReactiveFronts	217	Ingénieur de recherche en microbiologie J. Farasin, postdoc C. Bouchez, doctorat M. Garry, équipement et missions pour la caractérisation et expérimentation sur le transport réactif
			Bourse ministère	100	Doctorat I. Osorio
			ANR Stock en socles	150	Doctorats J. de La Bernardie, E. Chatton et L. Bethencourt
			Région Bretagne et Rennes Métropole	100	Postdoc C. Bouchez

			Projet Marie Curie M. Klepilova	175	Projet Marie Curie sur le transport de chaleur dans les milieux fracturés
TOTAL	35		TOTAL	1125	
Auverwatch					
OPGC	24		Agence de l'Eau Loire Bretagne	45 (9 k€ par an) + 50	50 k€ attribués pour le financement de la thèse de Jordan Labbe
CAM	90	Prestations analytiques			
Laboratoires Vichy – L'Oréal	6	Mécénat	Fédération des Recherches en Environnement	8	
SNO H+	20	Equipements complémentaires pour installation DTS	ICCF – Observatoire de l'Allier	6	
			ZATU	4	
			Observatoire RENOIR	2	
			I-Site CAP 20-25	50	50 k€ attribués pour la thèse de Jordan Labbe
			CAM	10	
TOTAL	120		TOTAL	175	
LSBB					
SNO H+	35	2017-2021	Projet Interwells – financement TOTAL S.E.	180	2016-2020
Depart. AQUA INRAE	3.5	A partir de 2021. Ce montant est accordé pour les observations scientifiques sur l'ensemble de l'observatoire LSBB-Fontaine de Vaucluse	IR OZCAR	2	2019
UMR EMMAH	19	Aide pour les analyses hydrochimiques / isotopiques	Projet WIK- Région PACA	150	2015-2017
			Projet PikarstEau – financement (AU, H+, RBV)	15	2017
			Projet ALBION 2 – financement TOTAL S.E.	300	2020-2022
			Bourses ministères	200	Deux thèses

TOTAL	61.5		TOTAL	847	
Poitiers					
SOERE / INSU	36.3		AREVA	2	Mise à disposition du site
			IFP	4.5	Formation ext
UMR IC2MP	9.2		ISTO Orléans	13	Formation ext
			CPGF Avon	6.5	Mise à disposition du site
			CPER	121.0	Instrumentation et forages
TOTAL	45.5		TOTAL	147	
Larzac					
SNO H+	35		CNRS-INSU	50	Achat cosmic rays moisture sensor (2020)
OSU OREME	35		CNRS-INSU	2.5	Achat et installation flux de sève et sondes PS (2021)
Projet européen eLTER-Plus	3	Période 2019-2024	Financement thèse ITN Enigma	150	Financement thèse partagé avec l'entreprise Muquans
TOTAL	73		TOTAL	202.5	
TOTAL	585		TOTAL	2591.5	

Dépenses récurrentes et occasionnelles du SNO sur la période 2017-2021

Dépenses récurrentes sur 2017-2021			Dépenses occasionnelles sur 2017-2021		
Nature	Montant (k€)	Commentaire	Nature	Montant (k€)	Commentaire
Réseau					
Fonctionnement et missions	30 k€	Rencontres H+, informatique base de données, échanges avec équipes associées	Fonctionnement	45 k€	Missions, analyses, consommables
CDD	220 k€	CDD base de données hydrogéophysique pour les sites OZCAR	Equipement	50 k€	
TOTAL	250 k€			95 k€	
Ploemeur					
Fonctionnement et missions	35	Maintenance du site et missions	Equipement	100	
			Fonctionnement	100	
			Missions	50	Missions de terrain expérimentation Ploemeur-Guidel

			CDD	875	1 IR, 1 postdoc, 6 doctorants en cofinancement
TOTAL	35		TOTAL	1125	
Auverwatch					
Fonctionnement	112	Analyses, consommables et petits équipements	Salaire thèse	100	
			Fonctionnement	42	Analyses chimiques
Missions	8		Equipements	13	Sondes de mesures et logiciel
TOTAL	120		TOTAL	175	
LSBB					
Fonctionnement et missions	33	Analyses hydrochimiques - isotopiques	Equipement	370	RMP, station meteo, packers, sondes piezo, fluorimètre, dispositif extraction sève, Conception et mise en place des mesures automatiques hydrodynamiques
CDD	28,5	Contractualisation pour le suivi hydrogéophysique - Echantillonnage	Forages et analyses (projet TOTAL)	277	
			CDD	200	doctorants
TOTAL	61.5		TOTAL	847	
Poitiers					
Fonctionnement et missions	28	Maintenance, entretien véhicule, location engin levage, carburant	Equipement	94.5	Enregistreur niveau d'eau, Caméra Televiewer, Sondes TDR, Véhicule
Equipement	17.5	Sondes STS et fluo	Forages	52.5	
TOTAL	45.5		TOTAL	147.	
Larzac					
Fonctionnement et missions	73	Maintenance gravimètre, tour de flux et géophysique, analyses chimie, publications	Equipement	52.5	Flux de sève et Cosmic rays moisture sensors
			CDD	150	Thèse ENIGMA
TOTAL	73		TOTAL	202.5	
TOTAL	585		TOTAL	2591.5	

Annexe 4 : Liste des équipes et des projets exploitant les données de H+ sur la période d'évaluation

Site de Ploemeur

Partenaires	Projets de recherche	Période
UMR 6118 Géosciences Rennes	Bourses de doctorat, Projets Européens (ITN IMVUL, Interreg Climawat, ERC ReactiveFronts, ENIGMA), ANR Hydrogeodesy, ANR Mohini, projets régionaux (DATEAU..), ANR Stock en Socle, Equipex CRITEX, Rivières2070	2002-present
METIS – UPMC, France	Imagerie géophysique et tomographie des ondes S	2007-present
Virginia Tech (USA)	Hydrogéodésie et modélisation hydromécanique	2010-present
Université de Lausanne (Suisse)	Imagerie radar du mouvement du traceur dans les fractures (Thèse C. Dorn, Lausanne, Alexis Shakas 2014-2017) Signatures géophysiques de l'étalement et du mélange Inversion géostatistique des données de flux dans les milieux poreux hétérogènes	2010-present
Itasca Consultants S.A.S.	Écoulement et transport dans les réseaux de fractures : réduction de l'incertitude des modèles DFN par conditionnement aux données géologiques et géophysiques	2016 - present
Université de Liège (Belgique)	Inversion conjointe du test de la chaleur et du traceur de soluté pour l'imagerie des voies préférentielles Intégration de données hydrogéophysiques dynamiques dans un cadre géostatistique à points multiples	2016 - present
Forschungszentrum Jülich, Agrosphere Institute IBG-3 (Allemagne)	Imagerie à haute résolution des processus de transport avec l'inversion de la forme d'onde complète du GPR Suivi de la polarisation induite spectrale pour la quantification in-situ des réactions biochimiques	2016 - present
Oregon State University (USA)	Développement instrumental pour la distribution spatiale de l'écoulement dans les forages avec la fibre optique	2013-2017
CSIC Barcelona (Espagne)	Caractérisation du transport anomal dans les fractures	2011-present
Université de Nantes	EquipEx RESIF	2009-present
California State University (USA)	Caractérisation des milieux fracturés à partir de tests de pompage sinusoïdaux	2014-2017

CNAM – Ecole des géomètres et topographes	Développement d'outils de déformation	2016 – present
LSCE Saclay	Datation des eaux souterraines avec l'hélium 4	2017 - present
State Key Laboratory of Water Resources	Développement du modèle d'écoulement non-Darcien	2016 – present
INRS Québec	Recharge et flux à l'interface nappe-zones humides	2021- present

Site de Poitiers

Partenaires	Projets de recherche	Période
IC2MP UMR 7285	SO H+, CPER EAUX-SOLS	2002-present
IFPEN	Caractérisation de l'hétérogénéité du sous-sol par des méthodes sismiques et acoustiques	2008-present
CHYN, Neuchatel (Suisse)	Utilisation de statistiques à points multiples pour la modélisation directe et inverse de l'écoulement des eaux souterraines dans les aquifères carbonatés	2015-present
LHyGeS UMR 7517	Modélisation	2010-présent

Site de Larzac

Partenaires	Projets de recherche	Période
UMR 5243 Géosciences Montpellier	SO H+, SO RENAG, Thèse, RESIF	2009 - present
Hydrosciences Montpellier	Comparaison de l'échantillonnage chimique et du suivi de la gravité et d'écoulement	2016 - present
Lab. EMMAH, Université Avignon	Comparaison piézomètres de forage et de RMP	2008 - present
Université de Liège	Imagerie géophysique et suivi combinées	2016 - present
IPGP, Traces, GM	Géomicrobiologie des environnements karstiques	2020 - present
Muquans	Imagerie gravimétrique (Thèse A. Cooke, ITN ENIGMA)	2017 - 2021

Site de Hyderabad

Partenaires	Projets de recherche	Période
BRGM	CEFIRES/ Projets Européens 7PCRD (SARASWATI, SAPH PANI,) ANR MOHINI, Asia Pro ECO Sustwater	1999 - present
Université Rennes 1	Financements des thèses de N. Guihéneuf et M. Nicolas	2011-2018
Université de Liège	Traçages par fluorescence et thermique	2016-present
NGRI	Contamination spatiale et temporelle par les fluorures	2015- present

Site d'Auverwatch

Partenaires	Projets de recherche	Période
LaMP UCA	Nouvelles méthodes d'analyse des composés moléculaires dans l'atmosphère	2018
UCA	Auverwatch-3	2019-present
UBFC	Auverwatch-3	2019-present
AELB	Auverwatch-3	2019-present
Clermont Auvergne Métropole	Auverwatch-3	2019-present
Laboratoires Vichy	Auverwatch-3	2019-present
DDT Puy de Dôme	Auverwatch-3	2019-present

LSBB

Partenaires	Projets de recherche	Période
UMR EMMAH	Imagerie hydrogéophysique et suivi de l'écoulement non saturé	2011- present
UMR 6118 Géosciences Rennes	Modélisation à l'échelle locale	2010-present
Geosciences Montpellier	Modélisation à l'échelle locale	2008-present
Paris VI University (METIS)	Comparaison de RMP et de la sismique	2015-present
Université de Pau	Comparaison de GPR, d'ERT et de RMP	2012-present
TOTAL	Un laboratoire analogique pour construire des images des réseaux sur place	2018-2021

Annexe 5 : publications scientifiques et thèses des acteurs du SNO H+ 2017-2021

2021

Simon N., Bour O., Lavenant N., Faucheux M., H. Le Lay, Fovet O., Z. Thomas and L. Longuevergne. Combining passive and active-DTS measurements to locate and quantify groundwater discharge into streams, soumis à *HESS*.

Simon N. and O. Bour. An ADTS-toolbox for interpreting Active Distributed Temperature Sensing measurements, soumis à *Groundwater*.

Guillaumot L., L. Longuevergne, N. Lavenant and O. Bour. A frequency domain water table fluctuation method to estimate controls on recharge fluctuations in highly fractured aquifers, en révision à *Water Resources Research*.

Cooke, A.-K., Champollion, C., and Le Moigne, N.: First evaluation of an absolute quantum gravimeter (AQG#B01) for future field experiments, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 10, 65–79, <https://doi.org/10.5194/gi-10-65-2021>, 2021. [H+ cité]

Dewandel B., Lanini S., Hakoun V., Caballero Y. & Maréchal J.-C, 2021. Artificial aquifer recharge and pumping: transient analytical solutions for hydraulic head and impact on streamflow rate based on the spatial superposition method. *Hydrogeol. J.*, 29, 1009–1026, <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02294-9>.

Fores, B., Champollion, C., Lesparre, N. et al. Variability of the water stock dynamics in karst: insights from surface-to-tunnel geophysics. *Hydrogeol J* (2021). <https://doi-org.insu.bib.cnrs.fr/10.1007/s10040-021-02365-5> [H+ cité]

Lachassagne, P., Dewandel, B. & Wyns, R. Review: Hydrogeology of weathered crystalline/hard-rock aquifers—guidelines for the operational survey and management of their groundwater resources. *Hydrogeol J* (2021). <https://doi-org.insu.bib.cnrs.fr/10.1007/s10040-021-02339-7>

Mhanna, R., A. Naveau, M. Bueno, M. Shmeit, F. Ismail, C. Fontaine, G. Porel, J. Bassil, L. Caner, Concomitant behavior of arsenic and selenium from the karst infillings materials of the fractured carbonate Dogger Aquifer (Hydrogeological Experimental Site, Poitiers, France), *Chemosphere*, Volume 275, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129935> [H+ cité]

Ollivier, C., A. Olioso, S. Carrière, G. Boulet, K. Chalikakis, A. Chanzy, J.-B. Charlier, D. Combemale, H. Davi, C. Emblanch, O. Marloie, N. Martin-StPaul, N. Mazzilli, G. Simioni, M. Weiss, An evapotranspiration model driven by remote sensing data for assessing groundwater resource in karst watershed, *Science of The Total Environment*, 781, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146706>.

Pouladi B., N. Linde, L. Longuevergne and O. Bour. Individual and joint inversion of head and flux data by geostatistical hydraulic tomography, accepted in *Advances in Water resources*. [H+ cité]

Pouladi, B., O. Bour, L. Longuevergne, J. de La Bernardie and N. Simon. Modelling borehole flows from Distributed Temperature Sensing data to monitor groundwater dynamics in fractured media. *Journal of Hydrology*, 598:126450, 2021. [DOI | Data] [H+ cité]

Simon, N., Bour, O., Lavenant, N., Porel, G., Nauleau, B., Pouladi, B., Longuevergne L. and A. Crave (2021). Numerical and experimental validation of the applicability of active-DTS experiments to estimate thermal conductivity and groundwater flux in porous media. *Water Resources Research*, 57, e2020WR028078. <https://doi.org/10.1029/2020WR028078> [DOI | Data] [H+ cité]

2020

Bethencourt, L., O. Bochet, J. Farasin, L. Aquilina, T. Le Borgne, A. Quaiser, M. Biget, S. Michon-Coudouel, T. Labasque, and A. Dufresne. Genome reconstruction reveals distinct assemblages of Gallionellaceae in surface and subsurface redox transition zones. *FEMS Microbiology Ecology*, 96(5), 03 2020. [DOI] [H+ cité]

Blazevic, L. A., L. Bodet, S. Pasquet, N. Linde, D. Jougnot, and L. Longuevergne. Time-lapse seismic and electrical monitoring of the vadose zone during a controlled infiltration experiment at the Ploemeur hydrological observatory, France. *Water*, 12(5), 2020. [DOI | Data] [H+ cité]

Bochet, O., L. Bethencourt, A. Dufresne, J. Farasin, M. Pédrot, T. Labasque, E. Chatton, N. Lavenant, C. Petton, B. W. Abbott, L. Aquilina, and T. Le Borgne. Iron-oxidizer hotspots formed by intermittent oxic–anoxic fluid mixing in fractured rocks. *Nature Geoscience*, 13:149–155, 2020. [DOI | Data] [H+ cité]

Dal Soglio, L.; Danquigny, C.; Mazzilli, N.; Emblanch, C.; Massonnat, G. Taking into Account both Explicit Conduits and the Unsaturated Zone in Karst Reservoir Hybrid Models: Impact on the Outlet Hydrograph. *Water* 2020, 12, 3221. <https://doi.org/10.3390/w12113221>

Lesparre, N., J.-F. Girard, B. Jeannot, S. Weill, M. Dumont, M. Boucher, D. Viville, M.-C. Pierret, A. Legchenko, and F. Delay. Magnetic resonance sounding measurements as posterior information to condition hydrological model

parameters: Application to a hard-rock headwater catchment. *Journal of Hydrology*, 587:124941, 2020. [[DOI](#) | [Data](#)] [H+ cité]

Maréchal, J.-C.; Bouzit, M.; Rinaudo, J.-D.; Moiroux, F.; Desprats, J.-F.; Caballero, Y. Mapping Economic Feasibility of Managed Aquifer Recharge. *Water* 2020, 12, 680. <https://doi.org/10.3390/w12030680>

Mari, J.-L. , G. Porel, and F. Delay. Contribution of full wave acoustic logging to the detection and prediction of karstic bodies. *Water*, 12(4), 2020. [[DOI](#)] [H+ cité]

Mazzilli, N.; Chalikakis, K.; Carrière, S.D.; Legchenko, A. Surface Nuclear Magnetic Resonance Monitoring Reveals Karst Unsaturated Zone Recharge Dynamics during a Rain Event. *Water* 2020, 12, 3183. <https://doi.org/10.3390/w12113183> [H+ cité]

Musadji, N. Y. , L. Lemée, L. Caner, G. Porel, P. Poinot, and C. Geffroy-Rodier. Spectral characteristics of soil dissolved organic matter: Long-term effects of exogenous organic matter on soil organic matter and spatial-temporal changes. *Chemosphere*, 240:124808, 2020. [[DOI](#)]

Ollivier, C., N. Mazzilli, A. Olioso, K. Chalikakis, S. D. Carrière, C. Danquigny, C. Emblanch, Karst recharge-discharge semi distributed model to assess spatial variability of flows, *Science of The Total Environment*, Volume 703, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134368>.

Simon, N., O. Bour, N. Lavenant, G. Porel, B. Nauleau, B. Pouladi, and L. Longuevergne. A comparison of different methods to estimate the effective spatial resolution of FO-DTS measurements achieved during sandbox experiments. *Sensors*, 20(2), 2020. [[DOI](#)] [H+ cité]

Simon, N. , O. Bour, N. Lavenant, G. Porel, B. Nauleau, B. Pouladi, L. Longuevergne, and A. Crave. Numerical and experimental validation of the applicability of active-dts experiments to estimate thermal conductivity and groundwater flux in porous media. *Water Resources Research*, e2020WR028078, 2020. [[DOI](#) | [Data](#)] [H+ cité]

2019

Barbel-Périneau, A. , L. Barbiero, C. Danquigny, C. Emblanch, N. Mazzilli, M. Babic, R. Simler, and V. Valles. Karst flow processes explored through analysis of long-term unsaturated-zone discharge hydrochemistry: A 10-year study in Rustrel, France. *Hydrogeology Journal*, 27(5):1711--1723, 2019. [[DOI](#)] [H+ cité]

Burté, L., C. A. Cravotta, L. Bethencourt, J. Farasin, M. Pédrot, A. Dufresne, M.-F. Gérard, C. Baranger, T. Le Borgne, and L. Aquilina. Kinetic study on clogging of a geothermal pumping well triggered by mixing-induced biogeochemical reactions. *Environmental Science & Technology*, 53(10):5848--5857, 2019. [[DOI](#)]

Chatterjee, A. , M. Arshad, A. Selles, and S. Ahmed. Relation Between Water Level Fluctuation and Variation in Fluoride Concentration in Groundwater - A Case Study from Hard Rock Aquifer of Telangana, India. In H. I. Chaminé, M. Barbieri, O. Kisi, M. Chen, and B. J. Merkel, editors, *Advances in Sustainable and Environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and Water Resources*, pages 215--218. Springer International Publishing, 2019. [[DOI](#)]

de La Bernardie, J. , O. Bour, N. Guihéneuf, E. Chatton, L. Longuevergne, and T. Le Borgne. Dipole and convergent single-well thermal tracer tests for characterizing the effect of flow configuration on thermal recovery. *Geosciences*, 9(10), 2019. [[DOI](#)] [H+ cité]

Mizan, S. A., S. Ahmed, and A. Selles. Spatial estimation of groundwater storage from a 2D specific yield in the crystalline aquifer of the Maheshwaram watershed. *Journal of Earth System Science*, 128:185, 2019. [[DOI](#)] [H+ cité]

Mizan, S. A., B. Dewandel, A. Selles, S. Ahmed, and Y. Caballero. A simple groundwater balance tool to evaluate the three-dimensional specific yield and the two-dimensional recharge: Application to a deeply weathered crystalline aquifer in southern India. *Hydrogeology Journal*, 27(8):3063--3080, 2019. [[DOI](#)] [H+ cité]

Mouyen, M. , L. Longuevergne, K. Chalikakis, N. Mazzilli, C. Ollivier, S. Rosat, J. Hinderer, and C. Champollion. Monitoring of groundwater redistribution in a karst aquifer using a superconducting gravimeter. In *E3S Web of Conferences*, volume 88. i-DUST 2018, 2019. [[DOI](#)] [H+ cité]

Nicolas, M. , O. Bour, A. Selles, B. Dewandel, V. Bailly-Comte, S. Chandra, S. Ahmed, and J.-C. Maréchal. Managed Aquifer Recharge in fractured crystalline rock aquifers: Impact of horizontal preferential flow on recharge dynamics. *Journal of Hydrology*, 573:717--732, 2019. [[DOI](#)] [H+ cité]

Quenet, M., H. Celle-Jeanton, O. Voldoire, J. Albaric, F. Huneau, J.-L. Peiry, E. Allain, A. Garreau, and A. Beauger. Coupling hydrodynamic, geochemical and isotopic approaches to evaluate oxbow connection degree to the main stream and to adjunct alluvial aquifer. *Journal of Hydrology*, 577:123936, 2019. [[DOI](#)] [H+ cité]

2018

Aquilina, L., C. Roques, A. Boisson, V. Vergnaud-Ayraud, T. Labasque, H. Pauwels, E. Pételet-Giraud, M. Pettenati, A. Dufresne, L. Bethencourt, and O. Bour. Autotrophic denitrification supported by biotite dissolution in crystalline aquifers (1): New insights from short-term batch experiments. *Science of The Total Environment*, 619-620:842--853, 2018. [[DOI](#)] [H+ cité]

- Bogena, H. R. , T. White, O. Bour, X. Li, and K.H. Jensen. Toward better understanding of terrestrial processes through long-term hydrological observatories. *Vadose Zone Journal*, 17(1):180194, 2018. [[DOI](#)]
- Champollion, C. , S. Deville, J. Chéry, E. Doerflinger, N. Le Moigne, R. Bayer, P. Vernant, and N. Mazzilli. Estimating epikarst water storage by time-lapse surface-to-depth gravity measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(7):3825--3839, 2018. [[DOI](#)] [H+ cité]
- Dangeard, M., L. Bodet, S. Pasquet, J. Thiesson, R. Guérin, D. Jougnot, and L. Longuevergne. Estimating picking errors in near-surface seismic data to enable their time-lapse interpretation of hydrosystems. *Near Surface Geophysics*, 16(6):613--625, 2018. [[DOI](#)] [H+ cité]
- de La Bernardie, J. , O. Bour, T. Le Borgne, N. Guihéneuf, E. Chatton, T. Labasque, H. Le Lay, and M.-F. Gerard. Thermal attenuation and lag time in fractured rock: Theory and field measurements from joint heat and solute tracer tests. *Water Resources Research*, 54(12):10,053--10,075, 2018. [[DOI](#)] [H+ cité]
- Fores, B. , C. Champollion, G. Mainsant, J. Albaric, and A. Fort. Monitoring saturation changes with ambient seismic noise and gravimetry in a karst environment. *Vadose Zone Journal*, 17(1):170163, 2018. [[DOI](#)] [H+ cité]
- Carrière, S., J. Ruffault, C. Cakpo, A. Olioso, C. Doussan, G. Simioni, K. Chalikakis, N. Patris, H. Davi, N. K. MartinSt-Paul, Intra-specific variability in deep water extraction between trees growing on a Mediterranean karst, *Journal of Hydrology*, Volume 590, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125428>. [H+ cité]
- Dewandel B., Lanini S., Lachassagne P., Maréchal J.-C., 2018. A generic analytical solution for modelling pumping tests in wells intersecting fractures. *J. Hydrol.*, 559, 89–99, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.013>.
- Gaillardet, J., I. Braud, F. Hankard, S. Anquetin, O. Bour, N. Dorflinger, et al. 2018. OZCAR: The French network of critical zone observatories. *Vadose Zone J.* 17:180067. doi:10.2136/vzj2018.04.0067 [H+ cité]
- Gérard, M.-F. , T. Le Borgne, O. Bour, C. Champollion, G. Porel, J. Bodin, L. Longuevergne, K. Chalikakis, J.-C. Maréchal, A. Selles, P. Pezard, H. Celle-Jeanton, G. Mailhat, L. Bodet, D. Jougnot, A. Battais, and P. Davy. 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. *Géologues : revue de l'Union française des géologues*, 195:22-27, 2018. [[DOI](#)]
- Mari J.-L. and G. Porel. *Well seismic surveying and acoustic logging*, chapter Contribution of seismic and acoustic methods to the characterization of karstic formations, page p. 117. *EDP Sciences*, 2018. [[DOI](#)] [H+ cité]
- Marçais, J. , A. Gauvain, T. Labasque, B. W. Abbott, G. Pinay, L. Aquilina, F. Chabaux, D. Viville, and J.-R. de Dreuzy. Dating groundwater with dissolved silica and CFC concentrations in crystalline aquifers. *Science of The Total Environment*, 636:260--272, 2018. [[DOI](#)] [H+ cité]
- Maréchal, J.-C., A. Selles, B. Dewandel, A. Boisson, J. Perrin, and S. Ahmed. An observatory of groundwater in crystalline rock aquifers exposed to a changing environment: Hyderabad, India. *Vadose Zone Journal*, 17(1):180076, 2018. [[DOI](#)] [H+ cité]
- Roques, C. , L. Aquilina, A. Boisson, V. Vergnaud-Ayraud, T. Labasque, L. Longuevergne, M. Laurencelle, A. Dufresne, J.-R. de Dreuzy, H. Pauwels, and O. Bour. Autotrophic denitrification supported by biotite dissolution in crystalline aquifers: (2) Transient mixing and denitrification dynamic during long-term pumping. *Science of The Total Environment*, 619-620:491--503, 2018. [[DOI](#)] [H+ cité]
- Tweed, S. H. Celle-Jeanton, L. Cabot, F. Huneau, V. De Montety, N. Nicolau, Y. Travi, M. Babic, L. Aquilina, V. Vergnaud-Ayraud, and M. Leblanc. Impact of irrigated agriculture on groundwater resources in a temperate humid region. *Science of The Total Environment*, 613-614:1302--1316, 2018. [[DOI](#)]

2017

- Carrière, S. D. K. Chalikakis, C. Danquigny, and L. Torres-Rondon. Using resistivity or logarithm of resistivity to calculate depth of investigation index to assess reliability of electrical resistivity tomography. *Geophysics*, 82(5):EN93-EN98, 2017. [[DOI](#)] [H+ cité]
- Chatterjee, A. , S. Sarah, P. D. Sreedevi, A. Selles, and S. Ahmed. Demarcation of fluoride vulnerability zones in granitic aquifer, semi-arid region, Telengana, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(24):558, 2017. [[DOI](#)]
- Chatton, E. , T. Labasque, J. de La Bernardie, N. Guihéneuf, O. Bour, and L. Aquilina. Field continuous measurement of dissolved gases with a CF-MIMS: Applications to the physics and biogeochemistry of groundwater flow. *Environmental Science & Technology*, 51(2):846--854, 2017. [[DOI](#)] [H+ cité]
- Dewandel B., Caballero Y., Perrin J., Boisson A., Dazin F., Ferrant S., Chandra S., Maréchal J.-C., 2017. A methodology for regionalizing 3-D effective porosity at watershed scale in crystalline aquifers. *Hydrological Processes*;1--19. doi:10.1002/hyp.11187. [H+ cité]
- Ferrant, S.; Selles, A.; Le Page, M.; Herrault, P.-A.; Pelletier, C.; Al-Bitar, A.; Mermoz, S.; Gascoin, S.; Bouvet, A.; Saqalli, M.; Dewandel, B.; Caballero, Y.; Ahmed, S.; Maréchal, J.-C.; Kerr, Y. Detection of Irrigated Crops from Sentinel-1 and

Sentinel-2 Data to Estimate Seasonal Groundwater Use in South India. *Remote Sens.* 2017, 9, 1119. <https://doi.org/10.3390/rs9111119>

Fores, B., C. Champollion, N. Le Moigne, and J. Chery. Impact of ambient temperature on spring-based relative gravimeter measurements. *Journal of Geodesy*, 91:269--277, 2017. [[DOI](#)] [[H+ cité](#)]

Guihéneuf, N., O. Bour, A. Boisson, T. Le Borgne, M. W. Becker, B. Nigon, M. Wajiduddin, S. Ahmed, and J.-C. Maréchal. Insights about transport mechanisms and fracture flow channeling from multi-scale observations of tracer dispersion in shallow fractured crystalline rock. *Journal of Contaminant Hydrology*, 206:18--33, 2017. [[DOI](#)] [[H+ cité](#)]

Le Coz, M., J. Bodin, and P. Renard. On the use of multiple-point statistics to improve groundwater flow modeling in karst aquifers: A case study from the hydrogeological experimental site of Poitiers, France. *Journal of Hydrology*, 545:109--119, 2017. [[DOI](#)] [[H+ cité](#)]

J. Schuite, L. Longuevergne, O. Bour, T. J. Burbey, F. Boudin, N. Lavenant, and P. Davy. Understanding the hydromechanical behavior of a fault zone from transient surface tilt and fluid pressure observations at hourly time scales. *Water Resources Research*, 53(12):10558--10582, 2017. [[DOI](#)] [[H+ cité](#)]

Schuite, J., L. Longuevergne, O. Bour, N. Guihéneuf, M. W. Becker, M. Cole, T. J. Burbey, N. Lavenant, and F. Boudin. Combining periodic hydraulic tests and surface tilt measurements to explore in situ fracture hydromechanics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(8):6046--6066, 2017. [[DOI](#)] [[H+ cité](#)]

Thèses (en cours ou soutenues)

NOM PRENOM	INTITULE THESE	ECOLE DOCTORALE	RESP THESE	DATE DEBUT	DATE SOUTENANCE
ELIOT CHATTON	Contribution of dissolved gases to the understanding of groundwater hydrobiogeochemical dynamics	EGAAL	Luc Aquilina		05/12/2017
JERÔME DE LA BERNARDIE	Modélisation et caractérisation expérimentale du transport de chaleur en milieu fracturé	EGAAL	Olivier Bour, J. R. de Dreuzy		06/12/2017
OLIVIER BOCHET	Caractérisation des hot spots de réactivité biogéochimique dans les eaux souterraines	EGAAL	Luc Aquilina, Tanguy Le Borgne		08/12/2017
LUCA GUILLAUMOT	Comment modéliser les systèmes aquifères au sein du cycle hydrologique? Une approche «multi-observables» à différentes échelles.	EGAAL	Olivier Bour, Laurent Longuevergne		20/12/2018
MARINE DANGEARD	Développement d'une approche « time-lapse » des méthodes sismiques pour l'hydrogéophysique et la compréhension de la dynamique des hydrosystèmes	GRNE	Roger Guérin, Ludovic Bodet		23/01/2019
MADELEINE NICOLAS	Impact de l'hétérogénéité sur la recharge naturelle et artificielle des aquifères cristallins altérés et fracturés : application aux sites de Maheshwaram et Choutuppal (Inde du Sud)	EGAAL	Olivier Bour	2016	07/05/2019
LORINE BETHENCOURT	Etude des bactéries oxydantes du fer dans les aquifères hétérogènes : rôle dans le fonctionnement biogéochimique des zones d'interface	EGAAL	Luc Aquilina, Alexis Dufresne		26/06/2019
LARA BLAZEVIC	Monitoring spatio-temporal water redistribution in the subsurface with seismic methods	GRNE	Ludovic Bodet, Laurent Longuevergne et Damien Jougnot	01/09/2017	18/09/2020

JUSTINE MOLRON	Conditionnement des modèles de réseaux de fractures à des données géologiques et géophysiques pour la réduction des incertitudes dans les modèles d'écoulement et de transport	EGAAL	Philippe Davy, Caroline Darcel, Niklas Linde	2017	08/02/2021
ANNE-KARIN COOKE	Characterisation of a new mobile absolute quantum gravimeter: Application in groundwater storage monitoring	Ecole doctorale GAIA, Université Montpellier	Cedric Champollion	01/09/2018	30/10/2020
NATALINE SIMON	Développement des méthodes actives de mesures distribuées de température par fibre optique pour la quantification des écoulements souterrains : apports et limites pour la caractérisation des échanges nappe/rivière	EGAAL	Olivier Bour		13/11/2020
THIERRY LABASQUE	Apports des traceurs environnementaux à la connaissance de l'âge des eaux souterraines	EGAAL	Luc Aquilina		27/11/2020
BEHZAD POULADI	Active DTS methods to quantify subsurface flow distribution and dynamics	EGAAL	Olivier Bour, Laurent Longuevergne	01/12/2017	02/03/2021
LAINA PEROTIN	Caractérisation de la recharge et des transferts au sein des aquifères karstiques par l'utilisation des gaz dissous	Ecole doctorale GAIA, Université Montpellier	V. De Montety	01/09/2019	
SERENE LEÏLA	Caractérisation hydrodynamique et hydrogéochimique multi-échelle et multidimensionnelle de l'hétérogénéité spatio-temporelle des flux au sein de la zone non saturée en milieu karstique. Implication sur la recharge, le temps de transit et la vulnérabilité de la ressource en eau des aquifères karstiques		dir C. Batiot, C. Emblanch, co-encadrement N.Mazilli	2019	
IVAN OSORIO	La respiration aérobie de la zone critique	EGAAL	Tanguy Le Borgne, Camille Bouchez, Thierry Labasque	2019	2022
MELISSA GARRY	Dynamique des « hot spots » de bactéries oxydantes du Fer	EGAAL	Tanguy Le Borgne, Hervé Tabuteau, Alexis Dufresne	2020	2023
ELIAS GANIVET	Représentation des paysages et rivières du futur sous pression climatique et anthropique : vers le croisement des approches physiques et sociologiques	EGAAL	V. Vantilbeurgh, L. Longuevergne	2020	2023
LABBE JORDAN	Etude de la vulnérabilité et de la réactivité des aquifères alluviaux face aux changements globaux, à partir de l'exemple de la nappe alluviale de l'Allier	EDSF - UCA	Hélène Celle-Jeanton / Gilles Mailhot	1/10/2020	31/9/2023

Annexe 6 : publications scientifiques et thèses des utilisateurs du SNO H+ 2017-2021

2021

del Val, L., Carrera, J., Pool, M., Martinez, L., Casanovas, C., Bour, O., and Folch, A. Heat dissipation test with fiber-optic distributed temperature sensing to estimate groundwater flux. *Water Resources Research*, 57, e2020WR027228, 2021. [[DOI](#)]

2020

Hoffmann, R. , P. Goderniaux, P. Jamin, E. Chatton, J. de la Bernardie, T. Labasque, T. Le Borgne, and A. Dassargues. Continuous dissolved gas tracing of fracture-matrix exchanges. *Geophysical Research Letters*, 47:e2020GL088944, 2020. [[DOI](#) | [Data](#)] [H+ cité]

Folch, A., L. del Val, L. Luquot, L. Martínez-Pérez, F. Bellmunt, H. Le Lay, V. Rodellas, N. Ferrer; A. Palacios, S. Fernández, M. A Marazuela, M. Diego-Feliu, M. Pool, T. Goyetche, J. Ledo, P. Pezard, O. Bour, P. Queralt, A. Marcuello, J. Garcia-Orellana, M. W Saaltink, E. Vázquez-Suñe and J. Carrera. Combining Fiber Optic (FO-DTS), Cross Hole ERT and time lapse formation electrical conductivity to characterize and monitor a coastal aquifer, *Journal of Hydrology* 588 (2020) 125050, 2020. [[DOI](#)]

Torrese, P. . Investigating karst aquifers: Using pseudo 3-D electrical resistivity tomography to identify major karst features. *Journal of Hydrology*, 580:124257, 2020. [[DOI](#)] [H+ cité]

2019

Junca, J. A. Bertoldi, D. O. Sabulsky, G. Lefèvre, X. Zou, J.-B. Decitre, R. Geiger, A. Landragin, S. Gaffet, P. Bouyer, and B. Canuel. Characterizing Earth gravity field fluctuations with the miga antenna for future gravitational wave detectors. *Physical Review D*, 99:104026, 2019. [[DOI](#)]

Hoffmann, R. A. Dassargues, P. Goderniaux, and T. Hermans. Heterogeneity and prior uncertainty investigation using a joint heat and solute tracer experiment in alluvial sediments. *Frontiers in Earth Science*, 7:108, 2019. [[DOI](#)] [H+ cité]

Mhanna, R. , A. Naveau, M. Bueno, L. Caner, and J. Bassil. Distribution of arsenic in an argillaceous sample using sequential chemical extractions: Application to the hydrogeological experimental site of Poitiers (HESP). In *E3S Web of Conferences*, volume 98, 2019. [[DOI](#)] [H+ cité]

Musadji, N. Y. and C. Geffroy-Rodier. Data for dynamics analysis of soil dissolved organic matter. Long term amendment effect. *Data in Brief*, 27:104665, 2019. [[DOI](#)]

Siena, M., M. Riva, M. Giamberini, P. Gouze, and A. Guadagnini. Statistical modeling of gas-permeability spatial variability along a limestone core. *Spatial Statistics*, 34:100249, 2019. [[DOI](#)]

Xiao, L. M. Ye, Y. Xu, and F. Gan. A simplified solution using Izbash's equation for non-darcian flow in a constant rate pumping test. *Groundwater*, 57(6):962--968, 2019. [[DOI](#)]

2018

Ménoret, V. P. Vermeulen, N. Le Moigne, S. Bonvalot, P. Bouyer, A. Landragin, and B. Desruelle. Gravity measurements below 10⁻⁹ g with a transportable absolute quantum gravimeter. *Scientific Reports*, 8:12300, 2018. [[DOI](#)]

Shakas, A. , N. Linde, T. Le Borgne, and O. Bour. Probabilistic inference of fracture-scale flow paths and aperture distribution from hydrogeophysically-monitored tracer tests. *Journal of Hydrology*, 567:305--319, 2018. [[DOI](#)] [H+ cité]

2017

Shakas, A. , N. Linde, L. Baron, J. Selker, M.-F. Gerard, N. Lavenant, O. Bour, and T. Le Borgne. Neutrally buoyant tracers in hydrogeophysics: Field demonstration in fractured rock. *Geophysical Research Letters*, 44(8):3663--3671, 2017. [[DOI](#)] [H+ cité]

Liu, M.-M., Y.-F. Chen, H. Zhan, R. Hu, and C.-B. Zhou. A generalized Forchheimer radial flow model for constant-rate tests. *Advances in Water Resources*, 107:317--325, 2017. [[DOI](#)] [H+ cité]

Thèses (en cours ou soutenues)

NOM PRENOM	INTITULE THESE	ECOLE DOCTORALE	RESP THESE	DATE DEBUT	DATE SOUTENANCE
ALEXIS SHAKAS	Characterizing Fracture Aperture and Transport Dynamics with Hydrogeophysics: Theoretical and Experimental Advances	Université de Lausanne	Niklas Linde		16/11/2017
IGNACIO LÁZARO ROCHE	Design, réalisation et test in situ d'une caméra muon pour des applications en sciences de la terre et en génie civil	SFA (Nice)	Stéphane Gaffet		08/10/2018
HOFFMAN RICHARD	Multiscale characterization of transport in heterogeneous porous and fractured aquifer media using innovative heat and solute tracer tests	Univ Liege	A. Dassargues et P. Goderniaux		14/01/2021

Annexe 7 Formulaire d'autodiagnostic FAIR des pratiques de gestion des données (proposée par THEIA/OZCAR)

Diagnostic FAIR d'un observatoire	Réponse	Question complémentaire	Réponse ouverte/ commentaire libre
1- Questions générales sur la gestion des données de votre observatoire			
Avez-vous établi un Plan de Gestion des Données pour votre observatoire?	partiellement		DMP effectué ENIGMA
Comment les utilisateurs peuvent-ils avoir connaissance des données produites par votre observatoire (métadonnées) ? (plusieurs réponses possibles)			
- Par le bouche à oreille et les contacts inter-personnels	oui		
- Données listées sur une page web	oui		
- Catalogue des données (ex : GeoNetwork)	oui		En cours, disponibles pour certains jeux de données
- Portail web d'accès aux données (ex : BDOH, HYSAE, etc...)	oui		
- Autre (si autre préciser)	oui	Si oui préciser	Liens vers les publications
Comment sont mises à disposition les données de vos observatoires ? (Plusieurs réponses possibles)			
- Contact direc avec le producteur des données	oui		
- Téléchargement direct de fichiers depuis le web (page web, site ftp, ...)	oui		
- Données téléchargeables sans métadonnées standardisées (ex : BDOH, HYSAE, etc...)	oui		
- Données téléchargeables et accompagnées de métadonnées standardisées (ex Geonetwork, flux standardisés, entrepôt du domaine ou institutionnel (ex: DataINRAE, DataSuds IRD, Zenodo, Pagaea, etc..)	oui		

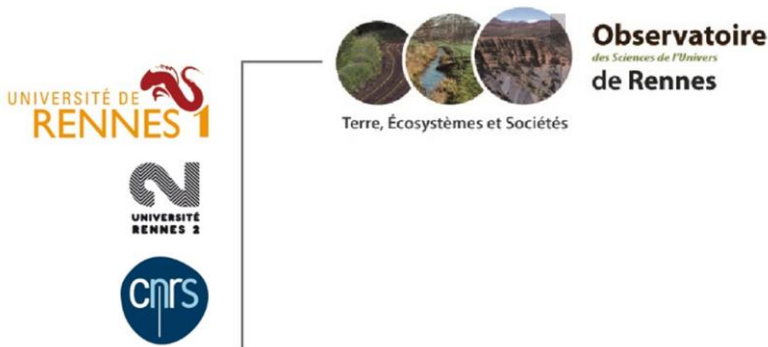
- Autre (si autre préciser)	oui	Si oui préciser	Possibilité de création de requetes personnalisées
Comment sont stockées/préservées les données de votre observatoire ? (plusieurs réponses possibles)			
- Disque dur des chercheurs	non		
- Espace partagé pour tout l'observatoire	oui		
- Base de données	oui		
- Dépôt sur un entrepôt de données	oui		
- Autre (si autre préciser)	non		
Existe-t-il des procédures de sauvegarde/préservation des données ?	oui	Si oui, préciser ce qui est mis en place	Bases de données et fichiers sauvegardés sur serveur externe
Disposez-vous de ressources humaines dédiées pour la gestion des données de votre observatoire ?	oui	Si oui, préciser le nom	Annick Battais
Avez-vous mis en place le format pivot pour rendre vos données visibles sur le portail Theia/OZCAR ?	oui		Export de données dans le format pivot
Questions sur le producteur des données (l'observatoire)			
Avez-vous choisi comment désigner l'observatoire de manière unique pour les citations?	non		Reflexion en cours (Hplus, H+)
Existe-t-il une description des objectifs et activités scientifiques de votre observatoire ?	oui		
Est-ce qu'on peut trouver une description de l'observatoire sur le web?			
- Sur une page web	oui	Si oui adresse http	http://hplus.ore.fr/en/
- Avez-vous déposé un DOI décrivant votre observatoire ?	oui		
- Votre observatoire est-il référencé sur le portail DEIMS?	oui		
Avez-vous identifié la.les personnes contact pour votre observatoire en tant que « Project Leader » ?	oui	Si oui disponible sur le web?	Olivier Bour, oui
Avez-vous identifié la.les personnes contact pour votre observatoire en tant que « Data Manager » ?	oui	Si oui disponible sur le web?	Oui
Disposez-vous d'une adresse générique?	oui	Si oui laquelle?	hplus-contact@univ-rennes1.fr
2- Questions sur les observations (chroniques, cartes, etc..)			
Les métadonnées sur vos données sont-elles consultables sans authentification ?	oui		
L'information sur les variables mesurées est-elle disponible sur le web ?	oui	Si oui ou partiellement, préciser où/comment	http://hplus.ore.fr/en/database/terms-of-use/metadata
Quelle est votre politique d'accès aux données (une seule réponse possible)			
- ouverte	oui		Compte
- ouverte avec embargo	non		
- Autres	non		

L'information sur les variables mesurées accompagne-t-elle les données téléchargées ?	oui	Si oui partiellement, préciser où/comment	ou	Si demandé à l'extraction
Pour les noms de variables, utilisez vous un vocabulaire standardisé de votre domaine pour favoriser la découverte et l'interopérabilité ?	partiellement	Si oui lesquels?	ou	GCMD
L'unité de mesures des variables accompagne-t-elle les données téléchargées ?	oui	Si oui partiellement, préciser où/comment	ou	Si demandé à l'extraction
Le fuseau horaire des dates est-il inclus dans les métadonnées du fichier téléchargé ?	non			
La localisation de la mesure accompagne-t-elle les données téléchargées ?	oui	Si oui partiellement, préciser où/comment (en particulier le système de projection est-il précisé?)	ou	WGS84, et oui si demandé à l'extraction
L'objet d'intérêt (ex : bassin versant, parcelle, brin de rivière, etc..) auquel la variable mesurée fait référence est-il clairement identifié lors du téléchargement des données ?	non			
La géométrie de l'objet d'intérêt accompagne-t-elle les données téléchargées ?	non			
Le capteur ou la méthode de mesure utilisée pour mesurer la variable accompagne-t-elle les données téléchargées ?	oui	Si oui partiellement, préciser où/comment	ou	Si demandé à l'extraction
Le format de données utilisés pour diffuser les données est-il un format ouvert et lisible par tous (.csv, .ncdf)? par opposition aux formats non open source (excel, etc.)	oui	Si oui partiellement, préciser les formats utilisés	ou	.csv
Le niveau des données est-il précisé (données brutes/ qualité validée / dérivées (issues d'une interprétation scientifique et/ou technique))	non			Mesures validées insérées
Fournissez-vous une information sur l'incertitude des valeurs que vous diffusez ?	partiellement	Si oui, comment		Oui pour les mesures de chimie
Comment fournissez-vous les conditions d'utilisation de vos données ? (plusieurs réponses possibles)				
- via une charte d'utilisation de vos données	oui	Si oui, donner la phrase de remerciements	de	In any case, the data source must be mentioned in the publication or in the acknowledgements in the form of "Data from the national network of hydrogeological sites H+, http://hplus.ore.fr/en/ "
- via une license d'utilisation de vos données	oui	Si oui : type de licence		CC BY-NC-SA

- autre	non	
Fournissez-vous un webservice standardisé d'échange de données de capteurs (ex: SOS ou SensorThings)	non	
3- Questions sur les jeux de données disponibles sur le web (si votre observatoire en dispose)		
Vos données sont-elles organisées en jeux de données ?	oui	
Les jeux de données possèdent-ils un titre informatique (variable, période, fréquence, lieu) ?	oui	
Les jeux de données possèdent-ils une description du jeu de données, compréhensible par un utilisateur qui ne connaît pas le jeu de données (contenu du jeu de données, conditions de son acquisition, localisation, période, etc...)?	oui	Pour les données spatialisées, et oui si demandé
Les jeux de données possèdent-ils un DOI ?	partiellement	En cours, procédure à automatiser
Le nom du créateur du DOI est-il identique pour tous les jeux de données?	oui	Data manager
Les contacts pour le jeu de données sont-ils identifiés ?		Oui si demandé depuis H+ et toujours disponible depuis THEIA et le catalogue GeoNetwork
- data manager (personne contact pour le jeu de données)?	oui	
- principal investigator(référent scientifique pour le jeu de données)?	oui	
- data collector (personne qui récolte les données)?	oui	Oui si demandé
- Project member (scientifique associé à la création du jeu de données)	oui	Oui si demandé
- aucun contact identifié	non	
Les financeurs pour le jeu de données sont-ils identifiés ?	non	
Les ressources documentaires associées au jeu de données (publications, documentation) sont-elles fournies avec le jeu de données ?	non	
Votre jeu de données est enrichi par des mots clés standardisés du domaine qui favoriseront sa découverte ?	partiellement	
Fournissez-vous un webservice standardisé de catalogage de jeu de données (ex: CSW)	oui	Si oui, préciser l'url (ou indiquez "Theia/OZCAR") https://www.osuris.fr/geonetwork

Annexe 8 Lettre de soutien du directeur de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, pilote du SNO H+

Note : La lettre de soutien de l'IR OZCAR a été envoyée directement au comité.



Jean-Raynald de DREUZY
Directeur de l'Observatoire
Directeur de Recherche CNRS

Université de Rennes 1
Campus de Beaulieu, bat.14B
35042 Rennes Cedex, France
☎ 02 23 23 68 69
Jean-Raynald.de-Dreuzy@univ-rennes1.fr

Rennes le 15 juillet 2021

Objet : Engagement de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes pour le pilotage du Service National d'Observation H+

Le service national d'observation H+ est coordonné par l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes depuis 2002. Il s'agit du SNO principal dont l'OSUR a la responsabilité. Le soutien au SNO H+ fait pleinement parti des enjeux de priorisation de ressources humaines et instrumentales de l'OSUR depuis sa création, tant pour la coordination du réseau que pour le site de Ploemeur, dont l'OSUR a également la responsabilité.

Les ressources humaines attribuées à la coordination du réseau et à la base de données incluent deux personnel CNAP (dont un recrutement en 2021) et la participation d'une ingénieur d'étude spécialiste des bases de données. Les ressources humaines ITA attribuées au site de Ploemeur incluent la participation d'un assistant ingénieur (ayant réussi le concours d'ingénieur d'étude en 2021), d'un ingénieur d'étude et de deux ingénieurs de recherche. Trois demandes d'ITA en lien avec les activités du SNO H+ font actuellement partie des priorités de l'OSUR : un technicien pour le soutien aux activités de terrain (CNRS), un assistant ingénieur pour le développement de réseaux de capteurs en lien avec le projet Terra Forma (université) et un ingénieur de recherche en microbiologie pour le développement de nouvelles méthodes pour l'étude des écosystèmes profonds (CNRS).

Les taux d'implication de ces personnels et des personnels sur les autres sites sont indiqués dans le dossier de labellisation. Les ressources humaines et instrumentales attribuées aux sites H+ permettent de faire fonctionner le réseau et les sites de manière efficace depuis près de 20 ans. Avec l'augmentation des activités en lien avec l'observation, certains sites sont en tension du point de vue ressources humaines. Nous nous coordonnons régulièrement avec les responsables de sites pour s'assurer que les besoins de moyens humains correspondant sont inscrits dans les priorités des autres unités hôtes.

Par cette lettre, je renouvelle ainsi l'engagement fort de l'OSUR dans le pilotage du service national d'observation H+, en coordination avec les autres unités hôtes des sites du réseau.

Jean-Raynald DE DREUZY
Directeur de l'OSUR