



# RAPPORT d' utilisation des crédits SOERE 2012

Systèmes d' Observation et d' Expérimentation au long terme pour  
la Recherche en Environnement

## Éléments descriptifs du Système d'Observation ou d'Expérimentation

### Intitulé de la plate-forme et site internet

**Nom du `SOERE :** SOERE *H+* *international*, réseau international de sites hydrogéologiques, pour la mesure et la modélisation du transfert et de la réactivité des eaux dans les aquifères hétérogènes.

**Site internet :** <http://hplus.ore.fr/> (le nouveau site web en cours de construction est accessible à l'adresse : <http://hplus.ore.fr/joomla/accueil> )

### Coordonnées des responsables scientifiques et techniques

Philippe Davy, directeur de recherche CNRS, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, campus de Beaulieu, 35042 Rennes, 0223236565, [philippe.davy@univ-rennes1.fr](mailto:philippe.davy@univ-rennes1.fr)

Tanguy Le Borgne, physicien adjoint CNAP, Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, campus de Beaulieu, 35042 Rennes, 0223236702, [tanguy.le-borgne@univ-rennes1.fr](mailto:tanguy.le-borgne@univ-rennes1.fr)

### Structures de rattachement

**Laboratoire porteur :** Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR), UMS 3343 CNRS

#### **Laboratoires impliqués :**

- **UMR :** Géosciences Rennes, UMR 6118 CNRS, IC2MP, UMR 7285, Géosciences Montpellier, UMR 5243, EMMAH, UMR 114, Géosciences Azur, UMR 6526, BRGM

- **Observatoires :** Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR), Observatoire de Recherche Méditerranéen en Environnement de Montpellier (OREME), Observatoire de la Côte d'Azur (OCA)

- **Partenaires européens :** Hydrogeology group CSIC – Université Polytechnique de Catalogne (Espagne), Forschungszentrum Jülich (Allemagne)

### Établissement(s) ou Organisme(s) de rattachement :

CNRS / INSU, BRGM, Université de Rennes I, Université de Poitiers, Université de Montpellier II, Université d'Avignon

*Partenaires institutionnels :* Université Polytechnique de Catalogne (Espagne), NGRI (Inde), CSIC (Espagne), Forschungszentrum Jülich (Allemagne)

### Rappel du cadre d'activité, de la structure du système en réseau, des observatoires élémentaires

Le SOERE *H+**international*, créé en 2012, est un réseau international de sites hydrogéologiques, qui regroupe le SO *H+* (Ploemeur, Poitiers, Majorque, Larzac), ainsi que 4 sites pilotés par des partenaires français (LSBB, Hyderabad) et européens (Llobregat, Krauthausen). Après sa labellisation en 2011, le SOERE *H+* *international* a été doté d'un budget en Mars 2012, renouvelé en Décembre 2012. L'activité du SOERE a été dédiée au renforcement de l'équipement des sites en lien avec le projet

CRITEX, au fonctionnement des nouveaux sites pilotés par les partenaires français, et aux discussions scientifiques avec les partenaires internationaux. Les financements en infrastructure et équipement des sites de Krauthausen et Llobregat sont assurés par les tutelles et institutions des pays correspondants.

## Contexte général

Le SOERE *H+* *international* est le fruit d'une réflexion menée depuis plusieurs années pour faire évoluer le réseau *H+* au niveau des sites, des équipes participantes et des collaborations internationales. La mission essentielle du réseau 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.

## Objectifs

Des objectifs scientifiques spécifiques et complémentaires sont définis en fonction des sites instrumentés : l'impact de l'exploitation sur le cycle de l'eau (Ploemeur et Hyderabad), le couplage entre la matrice poreuse et les structures fortement localisées (fractures ou karsts) (S.E.H. Poitiers), le cycle de l'eau sur de grands systèmes karstiques (Durzon), le monitoring des intrusions d'eau salée (Majorque), les écoulements dans la zone non saturée (LSBB), le développement des méthodes d'imageries géophysiques (Krauthausen), la technologie de barrière hydraulique contre les intrusions d'eau saline (Llobregat) .

## Résumé des activités 2012-2013

Aux cours des deux dernières années, les suivis hydrologiques, géophysiques et géochimiques sur les sites du réseau ont pu être assurés dans de très bonnes conditions, quasiment sans perte de données. Les activités menées sur les sites en 2012-2013 se résument en quatre points principaux :

- **Le développement et la validation des méthodes d'imagerie hydro-géophysique :** L'utilisation de mesures géophysiques pour estimer la distribution spatiale des propriétés hydrologiques a connu un fort développement durant ces dix dernières années (Hubbard et Linde, hydrogeophysics treatise 2011) parce qu'il s'agit des seules méthodes d'investigation non intrusives. L'ambition est d'obtenir à la fois des images hautes résolution de l'hétérogénéité du milieu et des estimations à grande échelle des paramètres hydrologiques effectifs. Si certaines techniques sont arrivées à maturité, la plupart des méthodes doivent encore être testées sur le terrain et adaptées pour les milieux hétérogènes. Les mesures effectuées en 2012-2013 sur les sites du SOERE *H+* couvrent une large gamme des méthodes géophysiques, incluant des campagnes géophysiques (sismique, électrique, géophysique de forage, résonance magnétique des protons, ground penetrating radar), des mesures hydrogéodésiques (inclinomètres longue base, inclinomètres de forage, GPS différentiel), ainsi que des mesures gravimétriques (absolue et relative). L'ensemble de ces mesures constituent une base de données unique pour progresser vers l'application sur le terrain des concepts de caractérisation hydro-géophysique. Cette activité est appelée à se développer fortement dans les prochaines années dans le cadre de l'équipex CRITEX.

- **La mesure des flux, des transferts et des temps de résidence :** La caractérisation de l'hétérogénéité des écoulements et son impact sur le transport des éléments est au cœur du questionnement scientifique des sites du réseau *H+*. Des mesures des débits d'écoulement sont pour

cela effectuées à différentes échelles (sol, forages, galeries). L'utilisation de la température comme traceur des flux est une méthode particulièrement prometteuse pour obtenir une caractérisation des flux à haute résolution spatiale. Les premières mesures de température et de vitesse d'écoulement par fibre optique ont été effectuées en 2012 et 2013 sur le site de Ploemeur. Cette technique toute récente sera appliquée aux autres sites dans le cadre de l'équipex CRITEX. En complément des mesures de flux, des campagnes d'essais de traçage ont été menées en 2012 et 2013 sur les sites. Les données obtenues apportent de nouvelles informations sur les temps de transfert dans ces milieux très hétérogènes et permettront d'apporter de nouvelles contraintes sur les modèles de transport dans la zone critique (sol/zone non saturée/aquifère).

- **La confrontation des modèles aux données et le problème inverse en hydrogéologie:** La production de données permettant de tester les modèles de prédiction des flux et du transfert des éléments dans les milieux souterrains est l'un des enjeux majeurs du SOERE **H+**. La confrontation des modèles aux données pose directement la question du problème inverse en hydrogéologie. La réflexion à ce sujet a été menée dès la création d'**H+** en associant des équipes de modélisateurs au développement des sites. Des progrès significatifs ont été obtenus dans ce domaine. Les données de sites **H+** sont utilisées pour tester des modèles à différentes échelles par des équipes dépassant largement le cadre d'**H+**. L'exemple du benchmark mené sur le site de Poitiers illustre cette démarche. Des recherches en partenariat avec l'Université de Lausanne (Suisse) sont aussi en cours pour intégrer les données hydrologiques aux mesures géophysiques (inversion radar) dans des modèles de transfert prenant en compte l'hétérogénéité du milieu.

- **La caractérisation des transformations biogéochimiques et du cycle des éléments :** Avec les progrès effectués dans le domaine de l'imagerie, de la mesure des flux et des temps de transfert, la caractérisation des propriétés de transport réactif devient abordable sur les sites **H+** et constitue un enjeu important pour la prospective du réseau. La contribution des eaux souterraines dans les cycles biogéochimiques a été relativement peu documentée jusqu'à présent, ce qui pourrait expliquer les difficultés récurrentes rencontrées pour effectuer des bilans géochimiques dans le cycle hydrologique. Cette question rejoint l'une des questions centrales du réseau RBV et sera traitée de manière coordonnée entre les deux réseaux à travers l'équipex CRITEX. Des opérations importantes ont été lancées en 2012-2013 sur les sites **H+** sur les interactions eau-roche (sélénium), le rôle des microorganismes dans le transport réactif (dénitrification), ainsi que le rôle des processus de mélange sur les réactions biogéochimiques (en particulier à l'interface eau douce - eau salée).

Concernant la **mise à disposition des données**, les années 2012-2013 ont été marquées par un travail important sur la base de données, avec l'intégration des nouveaux sites du réseau et la mise à niveau de l'ensemble des sites. Ceci a été possible grâce au recrutement de CDDs, cofinancés par le SOERE **H+** et les équipes pilotant les sites. Le taux d'alimentation de la base de données est désormais satisfaisant, avec cependant encore quelques disparités entre site. Cet effort sera poursuivi en 2014.

## Principaux travaux réalisés

### Imagerie hydro-géophysique

- Valorisation « hydrogéologique » des données sismiques 3D sur le site de **Poitiers** :

Les données géophysiques de sismique 3D haute résolution acquises en collaboration avec l'Institut Français du Pétrole (Fig. 1) sont utilisées comme éléments de contraintes pour des simulations stochastiques de réseaux d'écoulements préférentiels selon une approche de type « Monté-Carlo ».

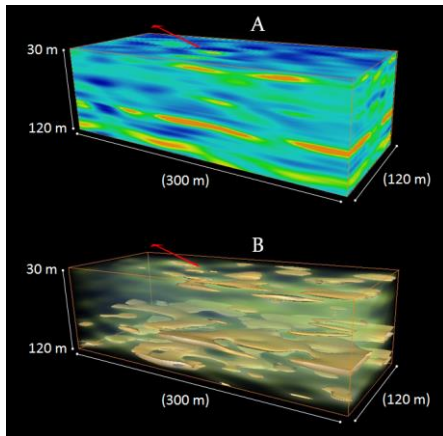


Figure 1: (A) Bloc 3D des pseudo-vitesses sismiques du site expérimental de Poitiers ; (B) extraction des zones de faibles vitesses assimilées aux hétérogénéités karstiques

- Investigation géophysique autour de l'observatoire GEK sur le site du **Larzac** afin d'identifier les structures potentiellement hydrogéologiques actives.

Dans le cadre de la mise en place du gravimètre supraconducteur à l'observatoire GEK, il était essentiel de caractériser le milieu et son hétérogénéité. Ainsi de la sismique, de la géophysique en forage et de la pétrophysique sur un forage carotté de 50 m ont été réalisés. Le principal résultat est la mise en évidence de couloir de faible vitesse sismique correspondant au couloir d'altération et à la fracturation visible en surface (fig. 2).

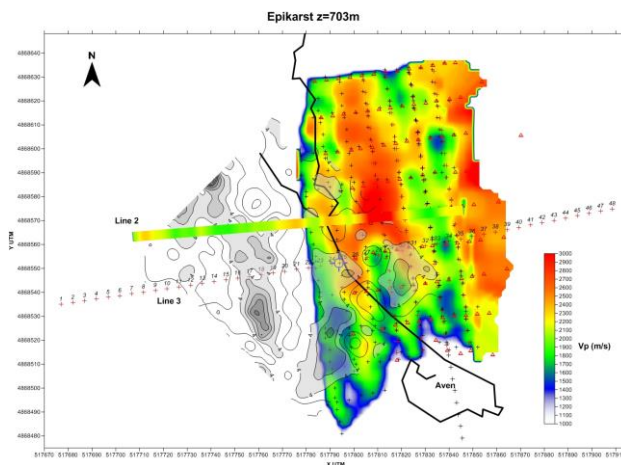


Figure 2 : vitesse des ondes P à l'altitude de 703m (~10m de profondeur) en couleur et isocontour de la topographie en noir et blanc. Le trait gras représente la topographie projetée à la surface de l'Aven des Dolines. Crédits : P-Y Galibert

- Caractérisation géophysique des structures hydrogéologiques sur le site du **LSBB**

Les campagnes de caractérisation du milieu karstique au droit du point d'écoulement D (écoulement pérenne à 35 m de profondeur) ont été poursuivies (thèse Simon Carrière), avec notamment une deuxième campagne de RMP (Résonance Magnétique de Protons) en février 2012. Ces mesures ont permis de valider la présence de stocks d'eau dans cette tranche de la zone non saturée; en

complément, la gravimétrie et la tomographie électrique ont permis d'observer des variations saisonnières de teneur en eau à différents niveaux de la zone non saturée et de les mettre en relation avec le régime d'écoulement du point D. La tomographie électrique apparaît comme une technique prometteuse pour suivre les transferts d'eau au cours d'un événement pluvieux et mettre en évidence une humectation des horizons superficiels. Des campagnes de GPR et de sismique ont été réalisées en partenariat avec d'autres laboratoires en décembre 2012. Les mesures inclinométriques longue base continues ont été poursuivies pour suivre la charge hydraulique du massif. Des mesures inclinométriques en forage (inclinomètre commercial Lily et inclinomètre développé dans le cadre de l'ANR Lines) ont également été réalisées.

- Suivi hydrogéophysique sur le site de **Majorque**

Le suivi hydrogéophysique du site à l'aide de la complétion multi-obturbateurs WestBay (puits MC2), de sondes Hydreka (puits MC8) et de profils diagraphiques répétés dans plusieurs puits se poursuit sur le site de Campos, en se focalisant sur l'étude des processus dans la zone de mélange entre eau douce et eau de mer. Pour cela Vanessa Hebert s'est appliquée dans son travail de thèse à produire une représentation de la structure des carbonates du site sur 8 ordres de grandeur, allant de l'imagerie tomographique RX de carottes à l'échelle du  $\mu\text{m}$  jusqu'à l'imagerie géophysique à échelle du site (Fig. 3). Ceci a permis de mettre en évidence les relations entre dissolution et de précipitation au sein de l'aquifère, montrant qu'à chaque zone de développement de vacuoles (en l'occurrence à 25, 38 et 58 m dans le puits MC2) correspond une zone de précipitation de calcite située juste en dessous, constituant une barrière de perméabilité qui focalise les écoulements juste au-dessus et ainsi accentue le processus de dissolution (Hébert et al., 2013; Garing et al., 2013a).

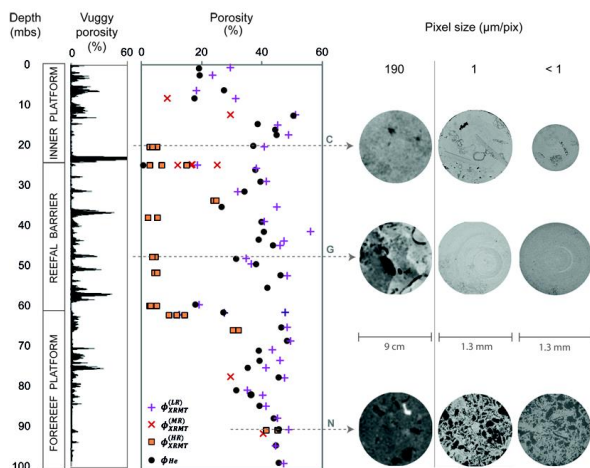


Figure 3 : Profil de porosité mesuré sur le site de Majorque et images au microscope associées

## Flux, transferts et temps de résidence

- Caractérisation du transport non réactif sur le site de **Poitiers** :

Des expériences de traçage à la fluorescéine sont réalisés d'une manière systématique entre les différents forages du site afin de déterminer la distribution spatiale des paramètres advectifs et hydrodispersifs de l'aquifère.

- Suivi hydrologique et caractérisation des propriétés de transport sur les sites d'**Hyderabad**

Sur le site de Maheshwaram les activités ont principalement permis de compléter les données acquises précédemment en prolongeant le suivi des variations de niveaux d'eau et les pluies. Une large partie de l'activité a été de mettre en place une base de données contenant l'intégralité des données acquises depuis plus de 10 ans sur le site et de les rendre accessibles sur le réseau **H+**. Les données sont aussi présentes sous forme de SIG. Sur le site de Choutuppal, des expérimentations spécifiques (tests hydrauliques) visant à caractériser la compartimentation des aquifères ont été réalisées. De plus des essais de traçage ou de push-pull ont été réalisés pour caractériser les processus de transport de soluté dans les milieux fracturés. Le suivi du site ainsi que son développement par de nouveaux forages a été effectué.

- Monitoring des points d'écoulements (hydrodynamique, hydrochimie) sur le site du **LSBB**

Le suivi hebdomadaire des points d'écoulements actifs (de 4 à presque 60 selon les conditions hydrologiques) inclut une mesure manuelle du débit, des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité électrique et température) et une analyse en laboratoire des échantillons d'eau (ions majeurs et carbone organique total). Une station de mesures des débits des points d'écoulements adaptée aux conditions particulières du site est en cours de développement. La mesure en continue de la fluorescence naturelle sera également ajoutée sur certains points en fonction du matériel disponible (Fluorimètre GGUN FL30.). La hiérarchisation de ces points d'écoulements avec la profondeur et le degré de fracturation – karstification a été analysée (thèse Aurore Barbel-Périneau).

- Mesure des vitesses d'écoulement sur le site de **Ploemeur**

En collaboration avec les Universités de Liège (P. Janin et S. Brouyères) et de Bochum (A. Englert), une comparaison de mesures de vitesse d'écoulement en forage mesurées soit par FVPDM (Finite Volume Point Dilution Method, Brouyères et al, WRR 2008) ou bien par la méthode classique de dilution (Drost et al., 1968) a été effectuée. L'innovation principale a été de réaliser ces mesures en milieu fracturé sous obturateurs à 80 mètres de profondeur et pour différents débits de pompage sur un forage adjacent. Outre le caractère darcéen des écoulements, les expériences montrent que la méthode FVPDM est plus précise bien qu'elle nécessite des durées d'expérimentation plus longues.

- Mesure spatialement distribuée par fibre optique de la température et des vitesses d'écoulement sur le site de **Ploemeur**

Depuis 2006, la fibre optique est apparue comme une innovation technologique majeure en hydrologie pour suivre les variations de températures notamment celles liées aux flux d'eau lors des échanges nappe-rivière mais n'avait pratiquement jamais été utilisée en forage. Pour tester son potentiel en hydrogéologie, des expériences innovantes ont été réalisées en 2012 et 2013 en collaboration avec les universités d'Oregon State University (John Selker, USA) et celle d'Eastanglia (T. Read et V. Bense, UK). Les premières expériences ont surtout consisté à montrer tout l'intérêt de la fibre optique pour caractériser les écoulements et le transport thermiques en milieu hétérogène (Fig. 4, Read et al., 2013). Une deuxième série d'expériences de 3 semaines à l'été 2013 nous a permis de tester l'intérêt de câbles chauffants pour la mesure des flux et des écoulements en forage. La mise au point de ces nouvelles méthodes de mesure laisse entrevoir de nombreuses applications en hydrologie et hydrogéologie.

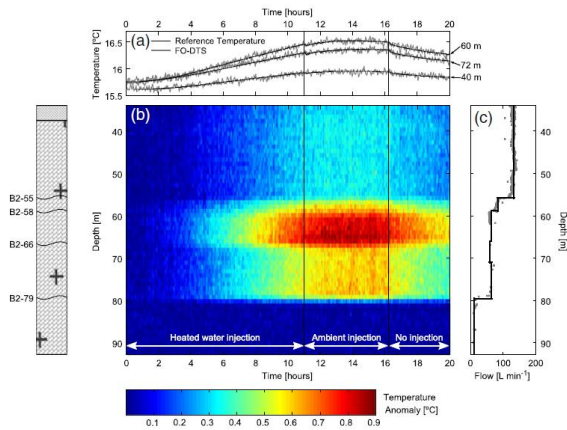


Figure 4 : Profils de température mesurés en forage à différents temps dans le cadre d'une expérience de traçage thermique sur le site de Ploemeur (Read et al., Geophys. Res. Lett., 2013). La fibre optique permet de détecter l'arrivée du traceur thermique à différentes profondeurs.

## Confrontation des modèles aux données et problème inverse

- Benchmark hydrodynamique sur le site de **Poitiers** :

En exploitant la base de données hydrogéologique **H+**, le projet INSU/EC2CO/MACH a permis de fédérer la plupart des équipes de recherches impliquées à l'échelle nationale dans la modélisation des réservoirs hydrogéologique (Géosciences Rennes, Sisyphe, Laboratoire de Combustion et Détonique, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LHyGeS Hydrosiences Montpellier, Centre de Géosciences : Ecoles des Mines de Paris, Hydrasa Poitiers). L'exercice de modélisation (Benchmark) consistait à prédire la réponse de la nappe (calcul des variations de charge hydraulique) lors de deux expériences en dipôle (injection-prélèvement) dans deux doublets de puits. Après retour des prédictions numériques fournies par chaque équipe, les expériences réelles sur le site ont été réalisées selon des configurations générales identiques à celles imposées pour l'exercice de prédiction. Un tel benchmark de modélisation hydrogéologique en milieu calcaire est une première à l'échelle internationale. Les résultats de cette étude démontrent que la capacité prédictive des modèles reste limitée à l'heure actuelle : malgré la quantité et la diversité des données disponibles, aucun des modèles testés n'a réussi à prédire la réponse de la nappe avec une précision acceptable. La « clé » du problème repose sur une meilleure caractérisation-modélisation des écoulements préférentiels dans les fractures et/ou les chenaux karstiques, qui constituent des chemins de moindre résistance dans lesquels les perturbations de pression et/ou les solutés peuvent se propager beaucoup plus rapidement que dans la porosité intergranulaire de la matrice rocheuse. Publication associée : Bodin et al., J. Hydrol (2012)

- Modélisation des mesures de débit dans les cavités sur le site du **Larzac**

La modélisation des mesures de débit dans les cavités sur le site du Larzac a mis en évidence un réservoir perché confiné ou dans des zones de très faible perméabilité (thèse de S. Deville (2013), publication en cours de rédaction). Ces réservoirs issus des modèles sont typiques de l'épikarst et pourraient correspondre aux niveaux piézométriques dans les forages près de l'observatoire. Ce stockage épikarstique a aussi été mis en évidence grâce à des mesures de gravité en surface et en profondeur (publication en cours de rédaction). En Oct. 2013, la thèse de B. Forès a débuté et portera sur l'interprétation et la modélisation des données du gravimètre supraconducteur ainsi que sur la variabilité haute fréquence (spatiale et temporelle) du stockage épikarstique. Par ailleurs, une réflexion est en cours sur un modèle conceptuel des karsts dolomitiques appuyé sur les observations géomorphologiques, géophysiques et géochimiques (Fig. 5).

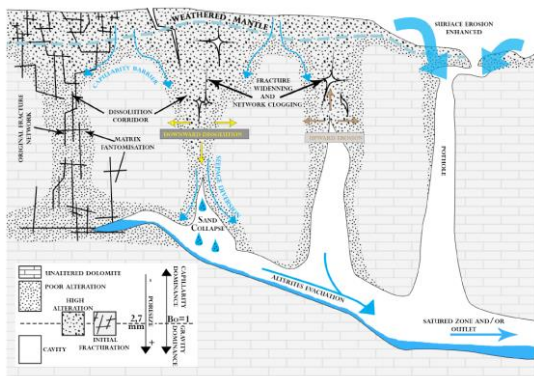


Figure 5 : Représentation conceptuelle du karst dolomitique du Durzon. Crédits : A. Meauxsoone.

- Intégration des mesures de datation des eaux dans le problème inverse (site du **Ploemeur**)

La thèse de Sarah Leray a porté sur l'intérêt et le contenu des données de datation pour modéliser les systèmes aquifères hétérogènes. Pour cela, son approche a reposée sur l'utilisation du site de Ploemeur comme site test (Leray et al., 2012 ; soumis). Dans ses travaux de modélisation, elle s'est également attachée à comprendre les raisons de la productivité exceptionnelle du site de Ploemeur (Leray et al., 2013).

- Inversion des données de débit et de température pour la caractérisation des milieux fracturés (site de **Ploemeur**)

Maria Klepikova a développé au cours de sa thèse des modèles d'inversion de données de flowmétrique (Klepikova et al., in press). Cette nouvelle méthode de tomographie des écoulements a également permis de développer une nouvelle méthode d'imagerie des propriétés du milieu basée sur la mesure des variations de température en forage (Klepikova et al., soumis).

- Inversion conjointe des données GPR, traçage et débit d'écoulement pour la caractérisation des milieux fracturés (site de **Ploemeur**)

Suite aux travaux d'imagerie des structures actives par les méthodes électromagnétiques (GPR, collaboration université Lausanne, C. Dorn et N. Linde ; Dorn et al, 2012 a et b), une modélisation conditionnée de réseaux de fractures discrètes a été entreprise à l'échelle d'un site expérimental (Dorn et al., sous presse). Nous avons notamment pu montrer l'intérêt de combiner des méthodes hydrologiques (flowmétrique, tests de traçages) et des méthodes géophysiques (GPR) pour modéliser à la fois la géométrie et les propriétés hydrauliques du milieu fracturé (Fig. 6).



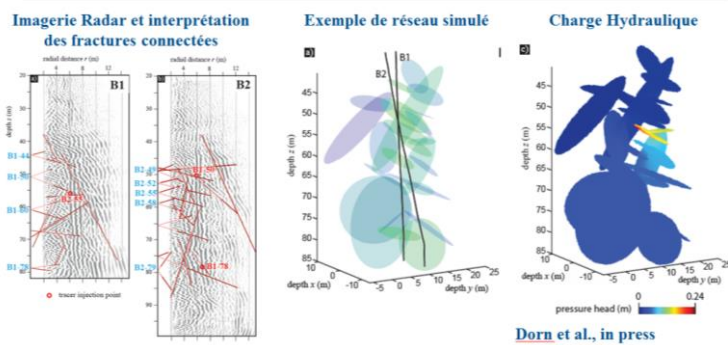


Figure 6 : Imagerie radar des fractures sur le site de Ploemeur, exemple de réseau simulé et distribution de la charge hydraulique dans les fractures (Dorn et al., in press)

- Analyse fréquentielle des chroniques piézométrique pour estimer la recharge (site de **Ploemeur**)

Une méthode d'analyse du contenu fréquentiel de chroniques piézométriques a été développée pour caractériser les processus de recharge en milieu hétérogène et estimer les propriétés du milieu à grande échelle (Fig. 7, Jimenez-Martinez et al., 2013)

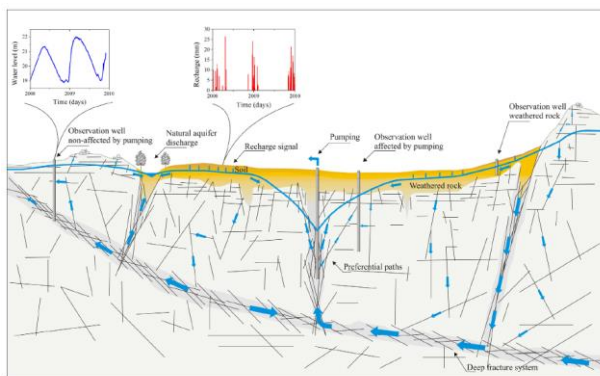


Figure 1. Conceptual scheme of a fractured aquifer. Fracture networks are characterized by a multi-scale heterogeneity. Arrow size represents the relative contribution to the flow of the different structures.

Figure 7 : Illustration de la diversité des chemins de recharge dans les milieux fracturés (Jimenez Martinez et al., 2013)

## Transformations biogéochimiques et cycle des éléments

- Origine et dynamique du sélénium dans les aquifères carbonatés sur le site de **Poitiers** :

Un nouveau forage carotté a été réalisé sur le site expérimental de Poitiers afin de recueillir des argiles noires non oxydées. Ces argiles noires sont suspectées d'être la source du Sélénium présent dans certains forages à des concentrations supérieures à la norme en vigueur pour les eaux potables (10 µg/l). Ces échantillons ont été soumis à différents types d'analyses (palynologie, minéralogie, XPS, batchs hydrochimiques) afin d'étudier (i) l'origine des argiles noires et du Sélénium, (ii) la spéciation du Sélénium et sa distribution dans la matrice, (iii) les mécanismes et cinétiques de libération du sélénium en milieu aqueux en contact avec la matrice solide (Thèse Joseph Bassil).

- Modélisation des processus de dénitrification dans les milieux poreux colonisés par des biofilms (sites de **Poitiers** et **Ploemeur**):

Une approche de modélisation de type « double continuum » a été développée pour interpréter des expériences de traçage non réactifs (fluorescéine) et réactifs (nitrates) réalisées conjointement dans des colonnes de laboratoire colonisées par des biofilms. Publication associée : Delay F. et al., J. Contam. Hydrol. (2013). Par ailleurs, des expériences de traçage réactif push pull ont pu être utilisées

pour proposer une modélisation de la chaîne complète de réaction pour la dénitrification autotrophe en milieu fracturé (Boisson et al., 2013).

- Caractérisation de l'image des processus de mélange à l'interface eau douce-eau salée sur les réactions biogéochimiques sur le site de **Majorque**

Charlotte Garing a étudié dans sa thèse l'origine des processus affectant le milieu poreux dans la zone de mélange. Des expériences en laboratoire ont permis de montrer que les dissolutions et dépôts de calcite observés à 70 m ne peuvent être expliqués par une simple réaction chimique entre carbonates, eau douce et eau salée. Par ailleurs, les prélèvements récents de fluide poral réalisés dans le puits MC2 ont fait l'objet d'analyses plus poussées, révélant pour la zone de transition à la fois un minimum de pH et d'oxygène ainsi qu'un maximum de  $\text{CO}_2$  et de matière organique dissoute (TOC) à 70 m (Fig. 8). Ces résultats semblent indiquer que l'activité microbologique tend à contrôler l'ensemble des processus qui affectent cette zone d'interface (Garing et al., 2013b).

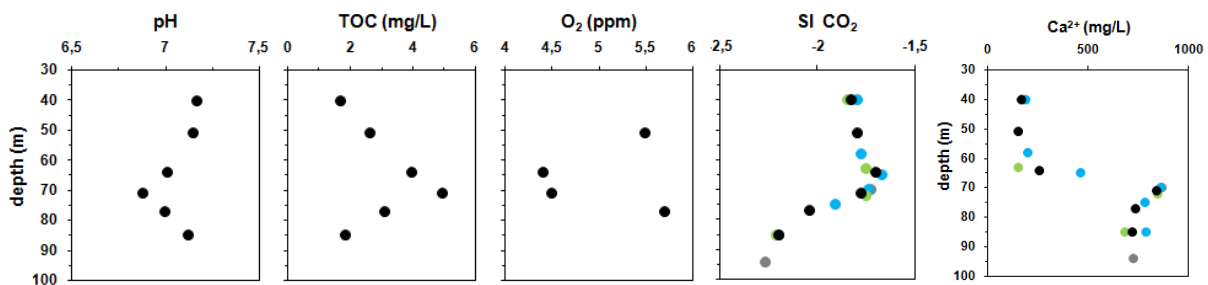


Figure 8 : profils géochimiques mesurés sur le site de Majorque à l'interface entre eau douce et eau salée (la transition se fait environ à 70 m de profondeur).

## Bilan des équipements acquis

### Site de Poitiers

- Capteurs de pression pour suivi de niveau piézométrique 2,8 K€
- station de travail HP, Ordinateur portable DELL, Licences logicielles 6,2K€
- Maquettes expérimentales en plexiglass 3,9K€
- Petit matériel / outillage site expérimental 0,9K€
- Petit matériel de laboratoire (analyses hydrochimiques) 2,2K€
- Groupes électrogènes 5.5k€

### Site du Larzac

Les équipements suivant ont été acquis et cofinancés en 2012-2013 par le SNO **H+**, le SOERE **H+**, l'ANR Hydrokarst G<sup>2</sup> et l'OSU OREME :

- Radiomètre Kipp&Zonnen CNR4 + CNF4 : mesure du bilan radiatif
- Sondes CTD Schlumberger (5) : mesure de température, pression et conductivité en forage
- Ordinateur de terrain permettant de récupérer les données de gravimétrie et débit en milieu souterrain.
- Onduleur pour le gravimètre supraconducteur.

## Site de Majorque

Pour le site de Majorque, les équipements suivant ont été acquis et cofinancés en 2012-2013 par le SNO **H+**, le SOERE **H+** et l'OSU OREME :

- Sondes CTD Schlumberger: mesure de température, pression et conductivité en forage
- Ordinateurs de terrain pour l'acquisition des données
- Ordinateurs pour le traitement des données.
- Télécommande à distance pour treuil du dispositif WestBay.

## Site du LSBB

- Fluorimètre 5,5K€
- CDD base de données 13,5K€
- Participation aux frais d'analyse 6,8K€

## Sites d'Hyderabad:

Equipements acquis 2012

- 3 capteurs de pression, température conductivité (CTD Divers - Shlumberger)
- 1 caméra de forage

Equipements 2013

- 1 PC de terrain
- Réparation sonde multi-paramètres de forages
- 2 Sondes piézométriques
- 6 capteurs de pression, 3 capteurs de pression-température-conductivité (CTD Divers - Shlumberger)
- 1 Prélèveur eau en forage
- 1 Fluorimètre de forage

## Site de Ploemeur:

- Débitmètre à hélice (SEFI) : 1k€
- Ordinateur Panasonic terrain : 3k€
- Capteur Piezo GSM OTT Ecolog 500 : 1.5k€
- Groupe électrogène : 1.3k€

## Valorisation et/ou avancement dans la structuration du SOERE

### Evolution de l'offre de service

La principale offre de service du SNO **H+** depuis sa création, et donc du SOERE correspondant, est de fournir une base de données issue du suivi et des expérimentations sur site, et un accès aux différentes équipes des infrastructures de site. Le programme SOERE a permis de développer significativement l'accessibilité à la base de données par la création d'une nouvelle interface google earth. Cela a facilité les collaborations scientifiques nationales et internationales qui sont très nombreuses au sein du SO et du SOERE. Les nouveaux sites du LSBB et d'hyderabad ont été intégrés à la base de données **H+** et les données sont en cours d'insertion.

Le site web du réseau a été entièrement rénové (voir la nouvelle version en test <http://hplus.ore.fr/joomla/accueil>). La description des nouveaux sites du réseau **H+ international** a été incluses et les contenus du site internet en français et en anglais ont été homogénéisés.

La mise à disposition des équipements (sondes de forage, fibres optiques, instrumentation géophysique, mesures géochimiques) a aussi beaucoup évolué notamment dans le cadre de l'équipex CRITEX pour lequel la collaboration entre les SOERE RBV et **H+** est exemplaire.

### **Système d'information environnementale**

Les développements visant à assurer l'interopérabilité de la base **H+** avec les autres bases environnementales sont bien avancés. Un groupe de travail a été mis en place dans le cadre du "Service de Gestion des Données Numériques" de l'Observatoire de Rennes depuis 2010 regroupant 7 ingénieurs et techniciens pour faire évoluer les métadonnées **H+** vers les normes ISO 19115 (directive européenne inspire 2007). Un géo-portail a été mis en place à l'échelle de l'OSUR. Des discussions sont en cours avec le BRGM, l'INRA et le réseau des bassins versant en vue d'utiliser et de développer, si possible, des outils communs.

### **Animations scientifiques et techniques**

Trois rencontres **H+** ont été organisées durant la période 2012-2013, réunissant l'ensemble des partenaires, y compris les partenaires étrangers (Jülich et Barcelone). **H+** a co-organisé à Rennes la conférence internationale G-DAT en Octobre 2012 sur la datation des eaux souterraines (<http://osur.univ-rennes1.fr/GDAT2012/page.php?14>). Cette conférence, qui a réuni environ 60 personnes provenant du monde entier, a contribué à la visibilité internationale du réseau **H+**.

Afin de développer les collaborations internationales du réseau, la rencontre du SOERE **H+** en 2013 a été organisée chez nos partenaires de Jülich (Allemagne). L'objectif de la rencontre était de rassembler les chercheurs européens développant des sites de recherche en hydrogéologie. En plus des partenaires du SOERE **H+ international**, la réunion a réuni des participants de l'UFZ (Allemagne), l'université de Tübingen (Allemagne), l'université de Bochum (Allemagne), l'université de Liège (Belgique), l'université de Mons (Belgique), l'université de Copenhague (Danemark), le centre de recherche Bioforsk (Norvège) et l'université de Neuchâtel (Suisse). Cette réunion a donné lieu à des présentations scientifiques prospectives sur les grandes questions scientifiques abordées sur les sites ainsi que à des discussions sur les opportunités de création de réseau européen (voir programme [http://hplus.ore.fr/index.php?lang=en&id\\_article=216&](http://hplus.ore.fr/index.php?lang=en&id_article=216&)).

Le SOERE **H+** a financé des animations et réunions techniques afin d'assurer la prospective et la veille instrumentale du réseau (participation au workshop fibre optique au Luxembourg, visite de l'entreprise geopro pour le développement des systèmes de packer, mission à l'ETH Zurich pour la calibration des sondes de mesure d'écoulement en forage, visite de l'entreprise Brugg en Suisse pour le développement de câbles en fibre optique). Enfin, plusieurs actions de formation se sont déroulées sur les sites du réseau (stages de masters en hydrogéologie et géophysique)

### **Gouvernance**

La gouvernance du SOERE **H+** international est décrite dans le précédent rapport d'avancement. Les équipes internationales (Barcelone et Jülich) participent au réseau mais ne reçoivent pas de financement de la part du SOERE sauf pour des échanges de chercheurs dans le cadre des projets ou expériences développés sur les sites. La direction est composée du responsable, du responsable-adjoint, des responsables de sites.

En terme de stratégie scientifique et institutionnelle, les évolutions majeures du SOERE *H+* *international* concernent deux points principaux :

- **Le développement des échanges entre les réseaux *H+* et RBV.** Cette convergence résulte de la prise de conscience de la nécessité de quantifier les échanges entre les composantes souterraines et superficielles des écoulements pour estimer les flux d'eau et d'éléments chimiques dans le cycle hydrologique. Ce rapprochement s'est concrétisé par l'organisation d'une réunion commune des deux réseaux à l'occasion du lancement de l'Equipex CRITEX.

- **L'intégration au réseau européen émergent sur la zone critique.** L'agrégation d'équipes européennes dans le réseau *H+* *international*, ainsi que le renforcement des liens avec le réseau des bassins versants, préfigurent la création d'un réseau européen de sites de recherche sur les eaux souterraines et les bassins versants, ayant une taille critique suffisante pour devenir une infrastructure européenne. Un réseau d'observatoires similaire a été mis en place aux états unis depuis 2007 (<http://www.criticalzone.org/>). De nombreux contacts ont été établis en 2013 avec nos partenaires européens (cf partie animation scientifique) et américains, en concertation avec le réseau RBV. Pour que ce projet puisse émerger en Europe dans le cadre du nouveau programme cadre pour la recherche et l'innovation, "horizon 2020", il faut que dès maintenant le CNRS et ses partenaires s'engagent dans une opération de lobbying auprès de la commission européenne.

## Bilan financier

Après la première dotation de 71.5k€ notifiée en mars 2012, une dotation de 145k€ a été notifiée en Décembre 2012 par l'alliance AllEnvi. La justification financière de la première notification a été détaillée dans le premier rapport d'avancement transmis fin Octobre 2012. Nous détaillons ci-dessous la répartition de la seconde dotation de Décembre 2012.

**TABLEAU 1: BUDGET EXECUTE 2012-2013 = SOERE *H+* ET SO *H+* (k€)**

Origine des crédits	Ressources	General (animation)	Base de données	Montpellier (Larzac et Majorque)	Poitiers (SEH)	Rennes (Ploemeur)	Avignon (LSBB)	BRGM (Hyderabad)
INSU (SOERE)	145 k€	21 k€	10 k€	22 k€	22 k€	22 k€	26 k€	22 k€
INSU (SO)	45 k€	10 k€	15 k€	10 k€	5 k€	5 k€	0	0

Ce budget a été dédié :

- au fonctionnement et à l'instrumentation des sites,
- au développement des collaborations internationales, notamment à travers l'organisation de la réunion européenne des sites de recherche en hydrogéologie
- au développement de la base de données pour intégrer les nouveaux sites et améliorer l'interface d'extraction des données.

## Annexe : Publications 2012-2013

### 2014

### 2013

- Carrière S., Chalikakis K., Sénéchal G., Danquigny C., Emblanch C., 2013. Combining Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study geological structuring of karst Unsaturated Zone. *Journal of Applied Geophysics*, 94, p. 31-41, doi : 10.1016/j.jappgeo.2013.03.014.
- Leray S., de Dreuzy J.-R., Aquilina L., Vergnaud-Ayraud V., Labasque T., Bour O. and Le Borgne T., Temporal evolution of age data under transient pumping conditions, *soumis à Journal of Hydrology, accepted with minor revisions*
- Klepikova M. V., Le Borgne T., Bour O., and J.-R. de Dreuzy, Inverse modelling of flow tomography experiments in fractured media, *Water Resour Research*, sous presse.
- Dorn C., Linde N., Le Borgne T., Bour O. and J.-R. de Dreuzy, Conditioning of stochastic 3-D connected fracture networks to hydrological and geophysical data, *Advances in Water Resources*, sous presse.
- Jiménez-Martínez J, Longuevergne L., Le Borgne T., Davy P., Russian A., Bour O., Temporal and spatial scaling of hydraulic response to recharge in fractured aquifers: Insights from a frequency domain analysis, *Water Resour. Res.*, 49, doi:10.1002/wrcr.20260.
- Read T., Bour O., Bense V., Le Borgne T., Goderniaux P., Klepikova, M.V., Hochreutener R., Lavenant N., and Boschero V., Characterizing groundwater flow and heat transport in fractured rock using Fibre-Optic Distributed Temperature Sensing, *Geophysical Research Letters*, vol. 40, 1–5, doi:10.1002/grl.50397, 2013
- Boisson A, de Anna P, Bour O, Le Borgne T, Labasque T, and Aquilina L, Reactive push-pull tests to quantify nitrate consumption, nitrous oxide and nitrite production during denitrification, *J. of Contaminant Hydrology*. Volume 148, pp 1-11, 2013.
- Leray S., de Dreuzy J.-R., Bour O., Bresciani, E., Numerical modeling of the productivity of vertical to shallowly dipping fractured zones in crystalline rocks, *Journal Of Hydrology*. Volume 481, pp 64–75, 2013.
- Delay F., Porel G., Chatelier M., 2013, A dual flowing continuum approach to model denitrification experiments in porous media colonized by biofilms, *J. Contam. Hydrol.*, 150, pp. 12-24.
- Garing C., Luquot L., Pezard P.A. and Gouze P. (2013a) Electrical and flow properties of highly heterogeneous carbonate rocks, *AAPG bulletin* (in press) DOI:10.1306/05221312134
- Garing C., Luquot L., Pezard P.A. and Gouze P. (2013b). Geochemical investigations of saltwater intrusion into the coastal carbonate aquifer of Mallorca, Spain, *Applied Geochemistry* (in press).
- Hébert V. Gouze P., Mangane P.O., Pezard P., (2013), Quantification of carbonates petrophysical properties using 3D X-ray tomography, *Journal of Sedimentary Research* (in press).

### 2012

- Dorn, C., N. Linde, T., Le Borgne, O. Bour and M. Klepikova, Inferring transport characteristics in a fractured rock aquifer by combining single-hole GPR reflection monitoring and tracer test data, *accepté à Water Resources Research*.
- Leray S., de Dreuzy J.-R. Bour O., Labasque T. and Aquilina L., Contribution of age data to the characterization of complex aquifers, *Journal of Hydrology*, Volumes 464–465, 25 September 2012, Pages 54-68
- Aquilina L., Vergnaud-Ayraud V., Labasque T., Bour O., Molénat J., Ruiz L., de Montety V., De Ridder J., Roques C., and Longuevergne L., Nitrate dynamics in agricultural catchments deduced from groundwater dating and long-term nitrate monitoring in surface- and groundwaters, *Science of The Total Environment*, Volumes 435–436, 1 October 2012, Pages 167-178
- Dewandel B, J.C. Maréchal, O. Bour, B. Ladouche, S. Ahmed, S. Chandra, and H. Pauwels., Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and efficient porosity at watershed scale in crystalline aquifers, *J. of Hydrol.*, V 416-417, 24 January 2012, Pages 83-97
- Dorn, C., N. Linde, J. Doetsch, T., Le Borgne and O. Bour, Fracture imaging within a granitic rock aquifer using multiple-offset single-hole and cross-hole GPR reflection data, *Journal of Applied Geophysics*, Volume 78, March 2012, Pages 123-132
- N. Mazzilli, H. Jourde, T. Jacob, V. Guinot, N. Le Moigne, M. Boucher, K. Chalikakis, H. Guyard and A. Legtchenko, 2012 : On the inclusion of ground-based gravity measurements to the calibration process of a global rainfall-discharge reservoir model: case of the Durzon karst system (Larzac, southern France) *Environmental Earth Sciences*, DOI: 10.1007/s12665-012-1856
- S. Deville, T. Jacob, J. Chéry, C. Champollion, 2012 : On the impact of topography and building mask on time varying gravity due to local hydrology, *Geophysical Journal International*, in press
- Bodin J., Ackerer P., Boisson A., Bourbiaux B., Bruel D., de Dreuzy J.-R., Delay F., Porel G., Pourpak H., 2012, Predictive modelling of hydraulic head responses to dipole flow experiments in a fractured/karstified limestone aquifer: Insights from a comparison of five modelling approaches to real-field experiments, *J. Hydrol.*, 454 (1-2), pp. 82-100.

