

Vague D Campagne d'évaluation 2017 - 2018

Unité de recherche

Dossier d'autoévaluation

Informations générales

Nom de l'unité : UMR Metis 7619 (Milieu Environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols)

Acronyme : METIS

Champ de recherche de rattachement : Sciences de la Terre

Nom du directeur pour le contrat en cours : Jean-Marie MOUCHEL

Nom du directeur pour le contrat à venir : Jean-Marie MOUCHEL

Type de demande :

Renouvellement à l'identique

Restructuration

Création ex nihilo

Établissements et organismes de rattachement :

Liste des établissements et organismes tutelles de l'unité de recherche pour le contrat en cours et pour le prochain contrat (tutelles).

Contrat en cours :

- UPMC
- CNRS
- EPHE

Prochain contrat :

- UPMC (SU)
- CNRS
- EPHE

Choix de l'évaluation interdisciplinaire de l'unité de recherche ou de l'équipe interne :

Oui

Non

DOSSIER D'AUTOÉVALUATION

1. Présentation de l'unité

Introduction

Historique, localisation de l'unité.

L'unité de recherche s'est constituée initialement par le rapprochement du laboratoire de Géologie Appliquée de Paris 6 (métallogénie) et le Centre d'Informatique Géologique (hydrogéologie mathématique, modélisation, géostatistiques). Des hydrologues et des biologistes venus de l'ENS sont ensuite venus rejoindre l'unité, ainsi que des chimistes de l'institut d'Hydrologie et de Climatologie, rattachés par la suite à l'EPHE. Dans cette configuration, l'Unité pouvait aborder la circulation de l'eau et des éléments chimiques en surface et dans le milieu souterrain, et s'est intéressé également au fonctionnement écologique des hydrosystèmes. Certains de nos biologistes avaient également un fort tropisme pour la biogéochimie, et Sisyphe a été un excellent creuset pour le développement d'approches étudiant le devenir des éléments biogéniques dans un contexte alimenté par l'étude de fonctionnalités des micro-organismes de l'écosystème.

Par la suite, l'arrivée de l'équipe du Département de Géophysique Appliquée de Paris 6 apporté des compétences essentielles pour caractériser des sites d'intérêt majeur pour les hydrogéologues et les chimistes et biogéochimistes (sites pollués, zones ripariennes et nappes de proche surface), tout en permettant aux géophysiciens de se rapprocher d'un nouvel ensemble de débouchés pour leurs travaux contribuant au développement d'un nouveau domaine, l'hydrogéophysique.

Les tutelles de l'UMR Sisyphe étaient l'UMPC, le CNRS, l'Ecole des Mines et l'EPHE. L'IRD a également été tutelle de l'UMR, mais sur une durée limitée, avec un nombre de chercheurs qui est resté limité également, mais a néanmoins permis de développer des chantiers hors de France (Afrique sub-saharienne et Amérique du Sud notamment). A cette époque (fin des années 1990), un paysage de compétences solides est constitué au sein de Sisyphe pour permettre l'étude des systèmes hydrologiques et leurs réponses aux forçages météorologiques, climatiques et anthropiques, celle des couches de surface (sols, alluvions, couvertures d'altération) qui concentrent une grande parties des phénomènes hydrologiques et biogéochimiques, celle du fonctionnement biogéochimique des sols et des bassins versants, l'étude des hydrosystèmes plus profonds avec des travaux sur les ressources et ouvrant la porte à la paléo-hydrogéologie, l'étude des transferts de micro-polluants en surface et dans les sites pollués.

Par la suite, le paysage francilien de la recherche s'est complexifié, et des politiques d'institution ont abouti au départ de la tutelle Ecole des Mines, beaucoup de chercheurs de l'actuel Centre de Géosciences de l'Ecole des Mines ont cependant souhaité rester associés à l'UMR Sisyphe, et une convention a été signée dans ce sens.

L'UMR Metis est née du rapprochement de l'UMR Sisyphe de l'équipe GOME (géochimie organique et minérale) précédemment partie intégrante de l'UMR BioEMCo (7618). L'UMR Sisyphe avait été constituée de différentes spécialités (hydrologie, hydrogéologie, géophysique, biogéochimie et chimie des contaminants organiques). Avec l'arrivée de l'équipe GOME, la matière organique peut être abordée avec un discernement plus approfondi dans ses interactions avec le devenir des nutriments et des contaminants organiques, et avec des travaux de microbiologie environnementale. Par ailleurs les nouvelles compétences en géochimie minérale apportées par cette équipe viennent renforcer une thématique historique au sein de l'UMR Sisyphe.

L'UMR Metis bénéficie d'un fort héritage qui positionne ses travaux dans le domaine des surfaces continentales et aussi de celui de l'étude de la zone critique qui intègre la surface et le sous-sol jusqu'aux nappes phréatiques. Cet héritage s'inscrit aussi dans le concept d'anthropocène, et inclut dans ses travaux, au-delà des seuls impacts, l'étude des interactions entre la société et le milieu.

Structuration de l'unité

Pour réaliser ses missions, l'unité est composée de deux départements : Hydro(géo)logie Physique (HGP) et Biogéochimie (Biogeo). Cette structure plus intégrative qu'un ensemble d'équipes séparées favorise les échanges entre les différents groupes de recherche, notamment via une animation au sein des départements. C'est la volonté scientifique de rapprocher les compétences en géophysique (notamment caractérisation de l'encaissant et mesures directes de certains flux) et en hydrologie et hydrogéologie (notamment modélisation, sites de suivi) qui nous a amenés à constituer le département HGP. Au sein du département Biogeo, il s'agit de favoriser les interactions dans l'étude de différents types de composés (matières nutritives, carbone, matière organique, contaminants), les cycles de ces différents composants étant intimement liés. Les deux départements sont de taille équivalente.

L'organigramme fonctionnel est donné en annexe. Deux groupes de recherche (géophysique et hydrologie/hydrogéologie) composent le département HGP, ils correspondent à des regroupements thématiques naturels et pré-existants. Trois groupes de recherche constituent le département Biogeo : carbone et éléments nutritifs, géochimie de la matière organique et minérale, et contaminants organiques.

L'UMR Metis est équipée de plusieurs pôles techniques en cohérence avec ses thématiques de recherche (voir détails en annexe 2). Il s'agit de pôles analytiques pour la plupart (5 pôles) mais aussi d'un pôle de développement instrumental, d'un pôle portant l'instrumentation terrain (en géophysique, en hydrologie et en géochimie) et d'un pôle modélisation. Les pôles analytiques (« chimie des nutriments », « géochimie organique », « géochimie minérale », « contaminants » et « microbiologie ») fonctionnent en étroite interaction avec un des groupes de recherche avec lesquels ils travaillent majoritairement ou très significativement, et auprès duquel ils trouvent un appui scientifique. Cette configuration est nécessaire à leur bon fonctionnement, en raison des effectifs relativement restreints dans les pôles et pour faciliter les développements techniques et instrumentaux. Le pôle de microbiologie fonctionne de manière autonome, avec une forte spécificité, et collabore fortement avec les trois groupes de recherche du département de biogéochimie.

Le pôle « développement instrumental » correspond à une spécificité essentielle de notre groupe de géophysique qui réalise ce type de développements depuis de très nombreuses années, avec plusieurs brevets déposés. Le pôle « instrumentation-terrain » porte le parc d'instrumentation et est sollicité à la fois pour les besoins de la recherche et les besoins de l'enseignement. Il intègre des équipements pour la géophysique, qui peuvent être prêtés ou loués à l'extérieur, des équipements pour la mesure en hydrologie et les prélèvements, des équipements pour la biogéochimie (capteurs). Le pôle « modélisation et méthodes numériques » a permis la mutualisation de serveurs de calcul et doit encore se développer fortement.

Plusieurs des pôles techniques sont associés aux plateformes de l'OSU Ecce Terra (pôles de géochimie organique et pôle contaminant organique avec la plateforme GEORG de l'OSU, pôle instrumentation terrain avec la plateforme instrumentation de l'OSU, pôle géochimie minérale relié à la plateforme ALLIP6 de l'OSU, pôle de microbiologie en cours de rapprochement de la plateforme GEMME de l'OSU). La proximité entre les pôles techniques de l'unité et les plateformes permet de créer des liens techniques entre les spécialistes au sein de l'OSU, de réfléchir à des équipements concertés, qui peuvent être co-financés par l'OSU, et donne un cadre comptable pour des prestations internes et externes.

Le service informatique fournit des services supports communs à toute l'unité. Outre son parc d'informatique personnelle, l'UMR Metis est équipée d'une salle serveur destinée à accueillir quelques serveurs de calcul, utilisés par différentes équipes dans l'UMR, et à assurer un certain nombre de fonctions telles que du stockage et partage de données, l'accueil de serveurs Web de projets (virtualisés) et l'infrastructure logicielle de base de l'unité. Le service informatique exploite, met à jour et développe ces services.

Une équipe de gestion centralise toutes les opérations de gestion administrative et financière. Elle est composée de 4,3 ETP. Chacun des agents est affecté à une fonction, mais les compétences sont partagées pour permettre à l'unité de fonctionner durant les périodes d'absence ou de surcharge. Les fonctions principales sont : la mise en place et le suivi du budget et des conventions de recherche, la gestion et le suivi des commandes, la gestion et le suivi des missions, la gestion des ressources humaines (permanents, CDD et stagiaires) et l'accueil des arrivants, la gestion des données de l'unité avec sa direction. L'équipe de gestion se réunit régulièrement pour discuter des actualités, et de son organisation.

Tableau des effectifs et moyens de l'unité

Depuis le 1er janvier 2012, les effectifs de l'UMR sont nettement en baisse, avec cependant de fortes disparités selon les tutelles comme le montre le tableau suivant, dans lequel ont été inclus trois départs programmés au cours de l'été 2017. Sur les 5 années, le taux d'érosion est de 13 %, le taux de renouvellement calculé à partir des entrants et de l'effectif final est de 25 %. Si le taux de renouvellement est plutôt favorable car le renouvellement des personnes s'accompagne naturellement d'un renouvellement des idées, des méthodes et des motivations, le taux d'érosion est inquiétant. Il est concentré sur deux tutelles, le CNRS et l'EPHE. Les noyaux de base que constituent les groupes de recherche et les pôles techniques au sein de l'UMR ne sont pas très grands, et l'érosion des effectifs se traduit nécessairement par un affaiblissement qui peut être considérable pour certaines de composantes de l'unité. Les détails des impacts seront présentés dans les bilans des deux départements. Les départs sont pour moitié constitués de départs en retraite et pour moitié de mutations dans d'autres unités, mais avec peu de mutations liées à des promotions (2 seulement).

On compte dans l'unité 31 chercheurs et enseignants-chercheurs pour 21 ingénieurs et techniciens dont 9 dans les services communs (gestion & logistique, informatique) et 12 dans les pôles techniques. L'UMR compte aussi un nombre variable mais toujours significatif de CDD de longue durée (supérieure à 1 an) en appui technique à différents projets. Au 30 juin 2017, avec les ATER qui ont choisi l'UMR comme laboratoire d'accueil, ils sont au nombre de 8.

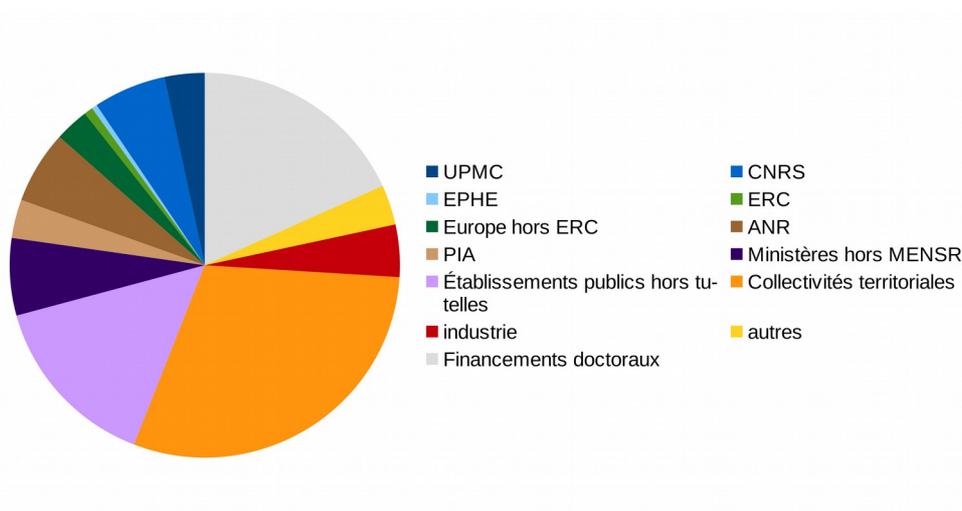
14 promotions (grades et corps) se sont produites au cours de la période 2012-2017, 7 concernent les agents CNRS, 5 les agents UMPC et 2 les agents EPHE. Le taux de promotion au sein de l'UPMC est donc nettement inférieur à celui des deux autres établissements. On notera que Sylvie Derenne a été nommée directrice de recherche cumulante au

sein de l'EPHE afin de reprendre la responsabilité du groupe de personnels de l'EPHE au départ en retraite de Marc Chevreuil.

| | Effectif actuel | Entrants | Sortants | Bilan |
|---------------------------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
| UPMC EC | 20 | 3 | 4 | -1 |
| UPMC IT | 8 | 2,5 | 2,5 | 0 |
| CNRS Ch | 8 | 2 | 5 | -3 |
| CNRS IT | 10 | 4 | 7 | -3 |
| EPHE EC | 3 | 1 | 3 | -2 |
| EPHE IT | 3 | 0 | 0 | 0 |
| Permanents | 52 | 12,5 | 21,5 | -8 |
| Emerites | 5 | | | |
| CDD, post-docs (LD), ATER | 8 | | | |
| Doctorants | 19 | | | |

Les moyens financiers de l'unité reposent sur les dotations de ses trois tutelles, pour un montant annuel d'environ 150000 euros auquel s'ajoutent des dotations complémentaires, sur projets. Elles se montent à 150000 euros également en 2015 et 2016, et ont été augmentées au cours des dernières années notamment avec l'apport des ressources sur programme mises en place par l'UPMC. Les ressources complémentaires par le CNRS portées sur le bilan en annexe incluent les ressources du programme de type EC2CO, LEFE ou NEEDS dans lesquels des fonds apportés par le CNRS sont complétés par des fonds venant d'autres instituts sans qu'on puisse aisément les distinguer.

L'UMR bénéficie de peu de fonds européens, avec aucun portage de projet H2020 ni d'ERC au cours des dernières années. Cependant, des chercheurs de l'unité sont partie prenante de deux réseaux ITN (un dans chaque département) qui ne sont pas gérés au sein de l'UMR. Ils sont aussi associés à des projets ERC qui permettent notamment le financement de post-doctorants qui contribuent aux activités de l'UMR. Ces ressources difficiles à quantifier ne peuvent pas figurer dans le bilan comptable de l'unité donné en annexe, de même que les ressources qui sont affectées à quelques projets pilotés et gérés par les Labex auxquels nous contribuons (L-IPSL et Matisse). Elles ont cependant été intégrées au graphique consolidé présenté ci-après, de même que les financements doctoraux attribués par l'école doctorale (pour l'essentiel ED 398 GRNE, Gestion des Ressources Naturelles et de l'Environnement). Le budget moyen annuel ainsi consolidé passe de 1930 k€ en moyenne annuelle à 2460 k€.



Les sources de financement de l'UMR Metis, en moyenne sur la période 2012-2016. Ce budget consolidé inclut les ressources provenant de projets (PIA, ERC) gérés hors de l'unité mais bénéficiant aux recherches menées par les chercheurs de l'unité, et les financements doctoraux attribués par les tutelles, mais il n'inclut pas les salaires des personnels permanents affectés à l'unité par ses tutelles.

Les appels d'offre nationaux de l'ANR mais aussi d'autres formes de financement du ministère de la recherche et d'autres ministères (Ministère de l'environnement, ADEME, INERIS) constituent des ressources importantes mais assez variables dans le temps, avec notamment un fort apport ponctuel en 2013 lié au projet CRITEX (PIA). La plus grande partie de nos ressources provient d'autres structures publiques (Agences de l'eau, GIP Seine-Aval, IRSN, CEA, etc.) et de collectivités territoriales (régions, dont Ile de France, SIAAP, SEDIF, etc.) pour la part la plus importante. La part

importante que les collectivités territoriales et autres structures régionales occupent dans le financement de nos projets de recherche est très cohérente avec nos sujets de recherche et la manière dont nous les abordons.

Les locaux utilisés par l'UMR Metis sont tous situés sur le campus de Jussieu de l'université Pierre et Marie Curie. Ils sont constitués de 4 « ailes » aux niveaux 3 et 4, regroupées autour de la tour n°56. Les laboratoires humides sont situés dans deux des ailes, avec les bureaux attenants destinés aux groupes de recherche les plus concernés. L'UMR dispose de 1320 m² de bureaux, de 690 m² de laboratoires et de caves (88 m²) destinés au stockage du matériel avec quelques salles de manipulations « sales ».

Politique scientifique

Un positionnement scientifique centré sur des Surfaces et Interfaces Continentales

La thématique centrale de l'UMR Metis concerne l'analyse et la modélisation des circulations d'eau et de matières dans des territoires où l'influence de l'homme est effectivement ou potentiellement significative. Les compétences de l'UMR permettent de développer ces questionnements en s'appuyant sur des compétences disciplinaires solides, en développant des méthodes (instrumentation, analyse, modélisation, concepts pour la description des systèmes étudiés) et en mettant en œuvre les interactions entre disciplines. Elle aborde des questions de recherche fondamentales portant sur le fonctionnement des hydrosystèmes et leur interaction avec les milieux et territoires qu'ils traversent. Elle répond également à des problématiques plus appliquées car les milieux sur lesquels elle travaille sont l'objet de tensions de plus en plus fortes (entre usages de l'eau, entre utilisation des terres et qualité des ressources en eau...) et des réponses concrètes sont attendues pour les gérer en limitant les risques.

Les questions scientifiques abordées dans l'UMR Metis concernent le fonctionnement physique et biogéochimique des milieux continentaux superficiels (sols et eaux) et profonds (aquifères/aquitards, zone critique) et leurs évolutions possibles sous différents forçages naturels et anthropiques (contamination, utilisation des ressources, modification du milieu, évolution de la morphologie, climat...). Les connaissances que nous produisons portent principalement sur la quantification de la circulation et des processus de transformation de la matière (eau, éléments biogéniques, contaminants) dans les hydrosystèmes et leurs éléments constitutifs (parcelles, cours d'eau, vallées alluviales, zones humides, aquifères...). Elles s'appuient sur des compétences fortes en hydrologie, en hydrogéologie, en géophysique et dans plusieurs domaines de la biogéochimie (cycle des éléments, caractérisation de la matière organique et des micropolluants...). Nous nous situons dans le domaine des « Surfaces et Interfaces Continentales », domaine dans lequel nous intégrons la surface, sa caractérisation et l'évaluation de ses interactions avec l'atmosphère, le sol et la zone non-saturée, et auquel nous intégrons aussi l'étude des aquifères tant leurs interactions avec les circulations à la surface (actuelle ou passée) sont importantes. Ce positionnement au cœur des « Earth Surface Sciences » nous a amené à nous impliquer dans des projets portant sur la « Zone Critique » qui se sont développés à l'échelle nationale et européenne au cours des dernières années.

Un point fort des activités de l'unité est d'être capable de proposer des approches pluridisciplinaires capables de faire progresser nos connaissances fondamentales sur la structure et le fonctionnement des milieux dans une approche quantitative incluant l'activité de l'homme au sein des territoires.

L'UMR Metis est impliquée dans la vie de la cité

Nous sommes également très concernés par l'application. La plupart de nos questionnements sur le fonctionnement des territoires et des hydrosystèmes sont directement liées à des problématiques sociétales majeures découlant de l'utilisation des ressources naturelles. Que le mode de développement de nos sociétés exploite d'une manière non durable des ressources dont le renouvellement est limité est aujourd'hui une évidence partagée. L'une de ces ressources, dont on découvre aujourd'hui la multiplicité des services rendus, est le territoire plus ou moins banalisé, ainsi que son sol et son sous-sol, sur lequel la société se développe et bénéficie de ce qui s'appelle aujourd'hui des services écosystémiques. Ressources en eau, ressources agricoles et forestières, espaces pour le transport et le développement des villes, ressources pour le transfert/stockage des déchets, espace en interaction avec l'atmosphère (qualité de l'air, climat régional et global), ressources pour l'énergie, et encore ressources pour le support de la biodiversité font référence à un territoire unique. La demande d'expertise de la part de la société est devenue plus forte, à la fois en réponse à la réglementation qui impose la mise en place de plans de gestion du milieu à moyen terme (voir la Directive Cadre sur l'Eau et leur déclinaison en SDAGEs en France), mais aussi parce que la collectivité a pris conscience de la nécessaire gestion « multi-objectifs » des milieux.

Ainsi, les membres de l'UMR sont fortement impliqués dans l'expertise auprès des collectivités et des industriels (*FM UMR 6*), pour des questions relativement localisées même si elles peuvent être d'intérêt national, mais aussi pour des questions portant sur des territoires plus larges. Il s'agit par exemple d'évaluer l'avenir d'une ressource en eau souterraine sous l'effet de pressions multiples (recharge affectée par le climat, exploitation pour l'irrigation et l'alimentation des villes, stockage de déchets), d'évaluer des stratégies de dépollution d'un site industriel, ou encore, à plus grande échelle, d'analyser le développement de l'activité agricole sur un territoire tout en préservant ses ressources en eau et en tenant compte des projections climatiques. Nous sommes convaincus de l'intérêt de poursuivre dans cette voie pour laquelle nous prévoyons que les grands enjeux futurs seront à la fois d'être capables de fournir des réponses de plus en plus étayées, y compris dans l'explicitation des incertitudes, et des réponses

capables d'intégrer les multiples facettes de l'utilisation d'un territoire et de son sous-sol, et leurs interactions, dans des échelles de temps de plus en plus longues.

Dans un réseau de collaborations cohérent

En cohérence avec ces objectifs, l'UMR Metis est fortement intégrée dans plusieurs structures importantes de niveau national ou régional. L'UMR Metis est impliquée au sein de l'IPSL et de son Labex pour deux objectifs majeurs (**FM UMR 5**) : (1) mieux intégrer le cycle de l'eau dans les modèles climatiques en améliorant notamment la quantification des interactions surface/atmosphère par une meilleure prise en compte de la circulation souterraine de l'eau, (2) contribuer à l'analyse de l'impact du changement climatique sur la fonctionnement des territoires en développant ses capacités de modélisation aux échelles d'abord régionales puis planétaires à termes.

L'UMR METIS s'appuie également sur le PIREN-Seine et la Zone Atelier Seine dans lesquels elle joue un rôle majeur (**FM UMR 2**) (gestion du programme PIREN-Seine et direction de la Zone Atelier Seine) (1) pour mener des travaux consacrés au fonctionnement des territoires en étroite interactions avec les acteurs locaux impliqués dans une démarche transdisciplinaire et (2) développer des approches pluri-disciplinaires sur des sites ateliers couplant hydrogéologie, géophysique et biogéochimie.

D'autres collaborations de recherche régionales fortes sont marquées par l'implication de l'UMR dans la fédération FIRE (la fédération FIRE est hébergée au sein de l'UMR Metis), avec de nombreux enjeux de recherche liés aux sols et à l'agronomie. Des conventions avec le centre de Géosciences de l'Ecole des Mines et avec l'unité HBAN d'IRSTEA (en préparation) sont des marques du fort niveau de collaboration que nous entretenons avec ces unités, et renforcent le réseau de compétence en hydrogéologie, hydrologie et biogéochimie, et consolident les capacités de développement de chantiers de terrain (**FM UMR 4**).

L'UMR Metis pilote depuis sa création l'association nationale GEOFCAN en géophysique de proche surface qui regroupe les principaux spécialistes de ce domaine en France (BRGM, IFSSTAR, IRSTEA, Universités....). Une convention avec l'INRAP est également en construction pour appuyer nos travaux en archéométrie, discipline qui constitue à la fois un domaine d'application de nos compétences pour l'exploration de l'environnement (géophysique, chimie environnementale...) et offre des connexions avec nos travaux sur les trajectoires des socio-écosystèmes.

Ces contributions fortes à différentes structures nationales et régionales positionnent l'UMR au sein de la communauté dans ses principaux domaines scientifiques. A l'échelle Européenne, nous sommes membres de deux ITN dans les domaines de la biogéochimie et de la géophysique. La construction de l'infrastructure ESFRI eLTER nous permettra de nous intégrer plus fortement dans une structure pérenne au niveau Européen. Par ailleurs, avec le soutien des équipes spécialisées de l'UPMC et de la FIRE nous encourageons nos jeunes chercheurs et enseignants chercheurs à se mobiliser pour répondre à des appels à projet type ERC, Marie-Curie ou H2020.

Une forte implication dans l'enseignement

Les enseignants-chercheurs de l'UMR Metis sont très fortement impliqués (porteurs) de plusieurs parcours de master (géophysique, géotechnique, hydrologie et hydrogéologie, géochimie environnementale, master professionnel sol, eau, environnement à l'UPMC UFR TEB, parcours géoscience de l'Ecole Polytech'Paris-UPMC, parcours de master Biodiversité et Gestion de l'Environnement à l'EPHE) et dans des parcours de licence (licence professionnelle ressources et qualité de l'eau, licence de sciences de la terre de l'UPMC).

2. Produits de la recherche et activités de recherche

Bilan scientifique

Les chercheurs de l'unité ont publié 450 articles dans des revues à comité de lecture et 57 chapitres d'ouvrages. Pour ramener cet effort de publication au nombre de chercheurs et enseignant-chercheurs, la règle suivante a été utilisée : les chercheurs comptent pour 1, les enseignants-chercheur comptent pour 0,5 (50 % de leur temps de service en recherche) et les partants ont aussi été comptés pour 0,5, quel que soit leur statut. Les émérites qui participent à l'effort de publication de l'unité ont été intégrés dans le décompte des chercheurs et enseignants-chercheurs. Le taux de publication obtenu à l'échelle de l'ensemble de l'unité est de 12 publications par équivalent-chercheur pour la période considérée (2012 à mi-2017). Ce taux est bien entendu inférieur au taux moyen de publications de chaque personne individuellement, en raison des nombreuses publications communes. Les chercheurs et enseignants-chercheurs de l'unité sont aussi co-auteurs de deux livres, en ont co-édité 2 ainsi que les actes de 2 colloques. Ils ont été éditeurs associés pour 3 numéros spéciaux dans des revues scientifiques.

Les tableaux suivants présentent les domaines dans lesquels les chercheurs de l'unité publient principalement, ainsi que les revues dans lesquelles ils publient le plus avec leurs classements (par quartile) dans chaque domaine. Les revues pluri-disciplinaires à haut facteur d'impact ont été comptabilisées à part. Les 4 domaines (issus du Web of Science) dans lesquels les chercheurs de l'UMR publient principalement, et qui comptent pour près de 70 % des publications, sont les suivants (dans l'ordre) : sciences de l'environnement, ressources en eau, géochimie et

géophysique et géosciences. Le pourcentage de publication le plus élevé est général dans le premier quartile des publications par domaine (revues classées par facteur d'impact). Une exception est le domaine géochimie et géophysique, dans lequel nous publions significativement dans le sous-domaine géophysique de surface pour lequel le taux de citation est structurellement moins élevé que celui du sous-domaine géochimie.

| Domaines de publication | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | total |
|--------------------------------|----|----|----|----|-------|
| Multidisciplinary sciences | 8 | | | | 8 |
| Environmental sciences | 61 | 43 | 4 | | 108 |
| Water resources | 75 | 8 | 1 | 3 | 87 |
| Geochemistry and Geophysics | 29 | 36 | 12 | | 77 |
| Geosciences | 28 | 3 | 7 | 2 | 40 |
| Meteo and atmospheric sciences | 16 | | | | 16 |
| Analytical chemistry | 7 | 5 | 2 | 1 | 15 |
| Agriculture | 9 | 1 | | 4 | 14 |
| Soil science | 5 | 3 | 3 | | 11 |
| Marine and freshwater biology | 9 | 1 | | | 10 |
| Physics, mathematical | 9 | | | | 9 |
| Mining and mineral processing | 1 | 8 | | | 9 |
| Engineering geological | 4 | | | | 4 |
| Physical geography | 3 | | | | 3 |
| Plant science | 2 | 1 | | | 3 |
| Engineering, chemical | | 3 | | | 3 |
| Ecology | 1 | 2 | | | 3 |
| Limnology | 1 | | | 2 | 3 |
| Engineering, petroleum | 2 | | | | 2 |
| Food science and technology | 2 | | | | 2 |
| Agronomy | 2 | | | | 2 |
| Remote sensing | | 2 | | | 2 |
| Mechanics | | 1 | | | 1 |
| Microbiology | 1 | | 1 | | 2 |
| Geology | | 1 | | | 1 |
| Astronomy and astrophysics | | 1 | | | 1 |
| Physical chemistry | | 1 | | | 1 |
| Biology | 1 | | 1 | | 2 |
| Civil engineering | | | 1 | | 1 |
| Pourcentages | 63 | 27 | 7 | 3 | |

| Journaux | n | Q |
|---|----|---|
| Nature Climate Change | 4 | 1 |
| Scientific Reports | 3 | 1 |
| Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America | 2 | 1 |
| Nature | 1 | 1 |
| Nature Communications | 1 | 1 |
| PLoS ONE | 1 | 1 |
| Nature Geoscience | 1 | 1 |
| Journal of Hydrology | 22 | 1 |
| Science of the Total Environment | 16 | 1 |
| Hydrology and Earth System Sciences | 14 | 1 |
| Organic Geochemistry | 13 | 1 |
| Environmental Science and Pollution Research | 13 | 2 |
| Geophysics | 12 | 2 |
| Hydrological Sciences Journal | 10 | 1 |
| Biogeochemistry | 9 | 1 |
| Environmental Research Letters | 9 | 1 |
| Physical Review E | 9 | 1 |
| Near Surface Geophysics | 9 | 3 |
| Water Resources Research | 8 | 1 |
| Hydrological Processes | 8 | 1 |
| Journal of Applied Geophysics | 8 | 2 |
| Geophysical Journal International | 7 | 2 |
| Geoscientific Model Development | 7 | 1 |
| Agriculture, Ecosystems & Environment | 7 | 1 |
| Biogeosciences | 6 | 1 |
| Journal of Hydrometeorology | 6 | 1 |
| Geophysical Research Letters | 6 | 1 |
| Climate of the Past | 6 | 1 |
| Hydrogeology Journal | 5 | 1 |
| Geochimica et Cosmochimica Acta | 5 | 1 |
| Regional Environmental Change | 5 | 2 |
| Archives of Environmental Contamination and Toxicology | 4 | 2 |
| Geophysical Prospecting | 4 | 2 |
| Chemosphere | 4 | 1 |
| Journal of Analytical and Applied Pyrolysis | 4 | 1 |
| Journal of Marine Systems | 4 | 1 |
| Advances in Water Resources | 4 | 1 |
| Archaeological Prospection | 4 | 3 |

L'examen des publications permet aussi de déceler les projets qui ont permis de développer des collaborations abouties entre groupes de recherche au sein d'un département ou entre départements. Ces publications ne sont pas encore très nombreuses (environ 5 % de l'ensemble des publications), c'est un « signal faible » que l'UMR devra renforcer.

Au sein du département BIOGEO, tous les projets inter-groupes ont impliqué la microbiologie. Un des projets a démontré l'effet de certains antibiotiques à dose environnementale sur la structure de populations microbiennes des sédiments de rivière (collaboration microbiologie-contaminants) (Chen et al., 2013). Des travaux sur le devenir de l'azote dans le bassin de la Seine et ses eaux, ses sédiments et ses sols ont permis les collaborations les plus fortes au sein du département BIOGEO. Des travaux sur le développement des différents groupes de bactéries actives et ses conséquences sur la dynamique de l'azote ont donné lieu à des échanges qui ont impliqué le groupe C-NUTS et les

microbiologistes (deux thèses, un post-doc), et ainsi que des hydrauliciens modélisateurs (de Mines-ParisTech) (Laverman et al., 2015, Raimonet et al., 2015, Vilmin et al., 2015, Khalil et al., 2013). Un travail sur les bactéries anammox dans les sols (Naeher et al, 2015) a regroupé microbiologistes et géochimistes organiciens.

Au sein du département HGP, plusieurs projets ont fait converger nos compétences en hydrogéologie et en géophysique. Dans le domaine des karsts, des travaux plus anciens (par exemple Valois et al., 2016 sur la caractérisation des circulations dans un épikarst) se sont largement développés par la suite grâce aux travaux menés sur le chantier partagé de Saint Martin le Nœud (Barhoum et al., 2014), qui commencent aussi à déboucher sur une collaboration avec les géochimistes grâce en particulier à l'appel d'offre interne à l'UMR. Les collaborations entre hydrogéologues et géophysiciens ont aussi abouti au travers de plusieurs projets destinés au suivi des hauteurs d'eau dans les nappes par des méthodes géophysiques dans plusieurs types de milieux (Pasquet et al., 2015, Mouhri et al., 2013), ou encore le suivi de panaches pollués (Razafindratsima et al., 2014).

Enfin des collaborations intégrant les deux départements ont été menées au travers d'une thèse sur la modélisation du transport des pesticides dans les sols (Queyrel et al., 2016) et dans le cadre complètement pluri-disciplinaire de l'expertise sur la compensation écologique dans le cadre du projet de ND des Landes (Billy (de) et al., 2015). Ce sont donc à la fois des lignes de collaborations anciennes qui ont continué à se développer avec une nouvelle dynamique au cours de la période évaluée (« dynamique de l'azote et écologie microbienne », « hydrogéophysique »), et quelques nouveaux projets qui ont pu émerger. Autant de pistes pour la suite de nos activités.

Les faits marquants (ci-après) ont été sélectionnés pour donner une illustration des activités de l'UMR. Sont présentés des faits qui concernent ensemble les deux départements de l'unité (d'autres faits marquants illustrent les activités de chacun de départements sont présentés plus loin dans le document). Il s'agit à la fois d'illustrer des thématiques scientifiques partagées entre les départements (étude des trajectoires socio-écologiques, *FM UMR 3*, archéométrie, *FM UMR 1*), de montrer l'implication de l'UMR dans des réseaux importants (intégration récente au sein de l'IPSL, *FM UMR 5*, redéploiement de la zone-atelier Seine, *FM UMR 2*).

Des éléments liés à la posture de l'unité sont aussi présentés dans les faits marquants, avec le poids important donné à différents types d'expertise (*FM UMR 6*), ponctuellement ou sur le long terme en cohérence avec notre positionnement scientifique, le développement de chantiers partagés (*FM UMR 4*), qui sont indispensables pour développer la pluri-disciplinarité dans le moyen terme, et le choix de collaborations dans des régions du monde qui présentent une sensibilité particulière face aux phénomènes que nous étudions (impact du changement climatique, impact de l'aménagement des territoires sur la ressource en eau,...), *FM UMR 7*, le bassin de la Seine restant un terrain privilégié pour toutes nos activités.

Données chiffrées

Les données chiffrées présentées le tableau Excel en annexe ont été comptabilisées à partir des données de production de l'unité présentées également en annexe.

Sélection des produits et des activités de recherche

Les publications et produits de la recherche ont été compilés en annexe. La liste principale est limitée à 20 % pour les publications dans des revues de rang A, pour les chapitres d'ouvrage et les participations à des conférences. Pour chacune des listes limitées à 20 %, le parti a été pris de présenter une liste privilégiant la représentativité. Ainsi le nombre d'éléments au sein de chacune des listes est proportionnel à la production de chaque groupe de recherche de l'UMR, et donc de nos thématiques scientifiques. Le choix a été fait de ne pas procéder à la sélection de 20 % dans les rubriques faiblement représentées car une telle sélection aurait perdu toute représentativité. Par ailleurs tous les (nombreux) doctorats soutenus au cours de la période ont été maintenus dans la liste principale.

Il n'a pas été possible de relever le nombre de relectures d'articles scientifiques réalisées par les chercheurs de l'UMR, la donnée fournie est le nombre de revues pour lesquelles des relectures ont été faites. De même, les (nécessairement nombreuses) évaluations réalisées dans le cadre de responsabilités dans des instances d'évaluation n'ont pas été répertoriées, mais seulement les évaluations d'équipe ou de projet réalisées à la demande d'instances d'évaluations dont les chercheurs concernés ne sont pas membres. La liste des communications dans des colloques ou séminaires sans actes ne peut pas être exhaustive, les communications orales et les communications par affiche ont été intégrées dans la liste. La liste complète des documents est donnée en annexe à l'annexe.

Faits marquants

FM UMR 1 - Archéométrie

L'archéométrie est une discipline qui met en œuvre des méthodes des sciences de la nature dans des problématiques archéologiques. Elle fait partie des disciplines orientées vers l'exploration et la caractérisation de l'environnement. Elle fait appel à différentes techniques qui doivent être intégrées dans l'analyse archéologique du site. Les groupes de géophysique et de géochimie organique de l'UMR sont particulièrement impliqués dans ces travaux qui réclament des développements méthodologiques spécifiques. Nous voyons un intérêt particulier dans ces développements qui

permettent de confronter nos savoir-faire à des enjeux différents de ceux qu'on rencontre pour l'analyse de l'actuel, et donc de les raffiner et d'étendre leurs domaines d'application. Par ailleurs, le travail dans le domaine de l'archéologie est aussi une ouverture vers des réseaux d'équipes plus orientés vers les sciences sociales et les relations homme/environnement. Cette ouverture vers l'archéologie doit aussi être mise en valeur dans le cadre des travaux de l'unité sur les trajectoires des anthropo-écosystèmes, l'objectif majeur de l'archéologie étant de reconstituer le fonctionnement des sociétés anciennes. Les perspectives de projets communs dans lesquels les compétences de nos archéomètres sont mises à profit sont très ouvertes et méritent de larges développements.

En prospection archéologique, les principales méthodes de la géophysique (ERT, GPR, magnétique) sont mises en œuvre. Elles permettent la caractérisation préalable du proche sous-sol sur la plupart des types de sites (Simon et al., 2012, 2015, Bermejo, 2014) dans différents contextes géologiques. Le point fort et l'originalité de notre groupe au niveau international se situe surtout dans l'innovation méthodologique qui nous a conduit à développer des méthodes complètement nouvelles comme la méthode électrostatique pour le milieu urbain ou l'interprétation « multipropriétés » des données des appareils électromagnétiques basse fréquence. Nos études portent également sur les propriétés physiques des matériaux archéologiques notamment sur la caractérisation des pierres constitutives des ouvrages anciens (Souffaché et al., 2016). Les géophysiciens de l'UMR Metis travaillent ainsi au sein d'un large réseau comprenant des laboratoires universitaires, sur des sites situés en France comme à l'étranger (Archéorient, Lyon II, avec qui nous contribuons à des projets de longue durée sur Chypre, UMR 7209 AASPE au MNHN, UMR 7041 ARSCAN, UMR 5608 TRACES, UMR 8167 « Orient et Méditerranée », LAMOP). Cette collaboration s'étend aussi aux établissements tels l'INRAP, aux collectivités territoriales (CG du Cher et du Calvados notamment) ou à des sociétés privées (EVEHA). Les mises en place de la COMUE Sorbonne Universités puis de la nouvelle université ont favorisé le renforcement des collaborations en archéologie, notamment de développer les projets avec le MNHN et avec l'UMR 8167.

Avec les outils de la géochimie organique, l'étude géochimique des foyers domestiques trouvés en contexte archéologique aide à préciser les premiers modes de vie des hommes dans leur rapport avec l'environnement. La matière organique subit, dans les foyers domestiques, des altérations thermiques qui lui confèrent une résistance élevée à la dégradation, tout en préservant certaines signatures géochimiques caractéristiques de ses sources et environnements. Ainsi, la caractérisation moléculaire de la matière organique résiduelle des foyers peut permettre d'en différencier les combustibles (os versus bois, Lejay et al. 2016). La dendrologie isotopique des charbons de bois peut renseigner sur l'adaptation des pratiques de collecte du bois de feu en fonction des variations climatiques (Baton et al. 2017). Ces thématiques de recherche font l'objet d'une double approche (i) des expérimentations pour établir des référentiels actuels de signatures géochimiques caractéristiques, (ii) des études de cas en contexte bien documenté pour valider les signatures établies précédemment et en généraliser l'application aux foyers archéologiques.

FM UMR 2 - Un vaste champ de recherche et de collaborations au sein de la Zone Atelier Seine

Depuis les débuts des programmes PIREN-Seine (1989) et Seine-Aval (1993), le laboratoire Metis a toujours fait le lien entre le bassin versant, son estuaire et sa zone côtière. Cette vision du continuum aquatique a permis en 2016 d'ouvrir la Zone Atelier-CNRS, qui était dédiée au seul PIREN-Seine jusqu'alors, au GIP-SA (GIP Seine-Aval) et à l'estuaire. Le programme OPUR consacré aux bassins versants urbanisés de l'agglomération parisienne, qui sont tout à fait centraux dans le bassin de la Seine, est venu compléter le dispositif Zone Atelier Seine. Le programme PIREN-Seine a été dirigé par un membre de l'UMR de 1989 à 2015 et est toujours administrativement géré au sein de l'UMR. La Zone Atelier Seine est aussi dirigée par un membre de l'UMR.

Cette ouverture facilite la poursuite des recherches avec une vision du continuum aquatique des têtes de bassin à la zone côtière. Le projet RESET quantifie et modélise le devenir de flux de nutriments du bassin versant de la Seine sur son estuaire (Passy et al., 2016, Romero et al., 2016b) et sa zone côtière (collaboration IFREMER). Ce projet introduit nouvellement au GIP-SA une problématique d'écologie/biogéochimie territoriale de la région normande pour comprendre le rôle du système agroalimentaire sur la qualité de l'eau en complément des approches qui avait été développées sur le bassin de la Seine (Le Noe et al., 2017), comme dans d'autres régions du monde (Billen et al., 2014).

La caractérisation de la MO au niveau moléculaire est actuellement effectuée en amont de la Seine (PIREN-Seine), mais également le long de la partie estuarienne, dans le cadre des projet MOSAIC (GIP-SA) consacré à l'étude de la dynamique de matière organique en lien avec les contaminants organiques et les nutriments (thèse Alexandre Thibault). Le projet TRAESSI étend vers l'estuaire les travaux consacrés à l'étude de la morphologie de l'hydrosystème et de son évolution à partir de méthodes historiques menés sur les grands axes dans le bassin de la Seine (histoire des îles, de l'approfondissement du chenal et des lignes d'eau (Steinman et al., soumis) en tirant partie notamment du corpus cartographique ArchiSeine développé dans l'unité en collaboration avec les archives nationales. La modélisation hydrogéologique avait été pionnière en ayant très rapidement intégré le bassin de Paris, au sens géologique, dans son ensemble.

Les collaborations avec le programme OPUR concernent essentiellement les flux de contaminants en milieu urbain et leur devenir et impact. Plusieurs projets menés au sein de la ZA Seine consacrés aux transferts et transformations multi-milieux des contaminants ont ainsi été développés à partir de bases de données de la Zone-Atelier (Gateuille et al., 2014, Gasperi et al., 2016, Teil et al., 2015). Ils montrent l'importance des agglomérations dans les circulations

via l'air, les sols et l'eau à l'échelle de l'ensemble du bassin. Un des derniers projets fédérateurs (inter-départements) en date concernait la crue exceptionnelle de juin 2016 (Mouchel et al., sous presse).

FM UMR 3 - Trajectoires socio-écologiques de systèmes fluviaux

Les travaux menés sur ces sujets au sein de l'UMR Metis et en collaboration (UMR Géographie-Cités, UMR LADYSS, bureau ASCA,...) sont fortement inter-disciplinaires, ils font intervenir des chercheurs des deux départements, et contribuent à enrichir les interactions que nous développons avec différents partenaires de la société en adoptant une position distanciée par rapport aux problématiques de relativement court terme qui les concernent le plus souvent.

Une approche interdisciplinaire et comparatiste a fait le lien entre la manière dont les sociétés ont perçues et gérées leurs rivières et les effets que les pressions anthropiques et cette gestion ont eu sur la qualité de ces hydrosystèmes depuis le XIXe siècle. Un premier projet a permis de montrer les spécificités des villes de Berlin, Bruxelles, Milan et Paris (PIRVE Ville, édition d'un ouvrage collectif avec 6 contributeur de l'équipe METIS) ainsi que le rôle harmonisateur en termes de politiques publiques et de qualité de l'eau des directives européennes. Un projet en cours (ANR Makara, 7 contributeurs de l'équipe METIS) montre la complexité de la définition de la qualité d'un cours d'eau, la place que prennent la mesure, les normes puis la surveillance pour décrire une certaine qualité de l'eau, ainsi que la diversité des trajectoires de différentes atteintes à cette qualité.

A la faveur du regroupement au sein de Metis de l'équipe GOME avec ses compétences en matière de biogéochimie des sols et de l'équipe CNuts, les travaux relatifs à l'agriculture et à l'approvisionnement alimentaire, qui ne figuraient pas véritablement dans notre cœur de métier, historiquement centré sur l'étude du continuum aquatique avant 2012, ont connu un essor considérable, à des échelles allant de la ferme aux systèmes régionaux et mondiaux. Ils s'appuient pour partie sur nos travaux de modélisation et dispositifs expérimentaux (*FM Biogeo 3*, *FM Biogeo 4*). L'approche originale de biogéochimie territoriale des systèmes agro-alimentaires que nous avons développée est aujourd'hui reconnue tant dans le milieu de l'agronomie (INRA, Agro-ParisTech), qui nous sollicite pour de nombreuses collaborations, que dans celui des organismes territoriaux (Ville de Paris, Régions). Nous participons ainsi avec la Mairie de Paris pour l'élaboration de sa « Stratégie Alimentation Durable » (cf *FM UMR 6*).

Les trajectoires sont également analysées en terme d'évolution de la morphologie des cours d'eau, dans le bassin de la Seine en particulier, avec une approche historique (documents d'archives, cartes) et hydraulique. Les transformations morphologiques sont de la conséquence plus ou moins effectivement contrôlé d'aménagements destinées à la navigation et la production d'énergie. Avec les variations hydrologiques, elles ont des conséquences considérables sur le fonctionnement écologique des cours d'eau (biogéochimie, populations piscicoles). On est bien là dans une problématique pluri-disciplinaire portant sur les interactions homme-milieu, sur des phénomènes de long terme dépassant l'échelle de la vie humaine, et d'intérêt particulier aujourd'hui dans le contexte de ré-habilitation écologique des milieux voulue par le DCE (Directive Cadre Européenne sur l'Eau).

Ces travaux s'appuient également sur les travaux menés sur les impacts hydrologiques du changement climatique et des pressions anthropiques (*FM HGP 3*) qui sont à la fois rétrospectifs et prospectifs notamment dans leurs applications nationales et européennes, et qui sont en relation directe avec les problématiques liées à morphologie fluviale, au système agro-alimentaire et à l'utilisation des ressources en eau par les villes développées plus haut.

FM UMR 4 - Implication sur des chantiers partagés (par les deux départements)

Au cours de la dernière période, l'importance des chantiers partagés au sein de l'UMR s'est accrue. Ces chantiers intègrent des projets des deux départements et sont donc un facteur important pour le développement des interactions pluri-disciplinaires. Les deux sites suivants sont particulièrement importants pour l'UMR au sein du bassin de la Seine, alors que notre implication dans d'autres projets portés au niveau du PIREN-Seine (*FM UMR 2*) impliquent aussi considérablement les membres de l'UMR (plaine alluviale de la Bassée, bassin versant de l'Orge...).

La carrière souterraine de Saint Martin Le Nœud

La carrière souterraine désaffectée de Saint Martin le Nœud (60) est un site pilote exceptionnel qui ouvre une fenêtre d'environ un km de long dans l'aquifère de la craie (une structure hydrogéologique majeure dans le bassin de Paris) à la limite entre la Zone Saturée et la Zone non Saturée et permet ainsi de boucler le bilan hydrique depuis la surface en passant par le sol et la ZNS jusqu'à la zone saturée (ZS) dans des lacs souterrains de la carrière (c'est-à-dire la nappe). C'est un observatoire qui permet l'étude des transferts d'eau et de solutés dans la zone non saturée. La longueur de la carrière donne accès à un gradient d'épaisseurs des diverses couches superficielles.

Des financements de la Région Ile de France et de la fédération IPSL ont permis la mise en place d'une instrumentation complète pour caractériser dans le temps et l'espace les eaux de la nappe et les eaux percolées, en qualité et quantité. Des campagnes géophysiques ont permis de caractériser spatialement la nature et la structure de la ZNS recouvrant la carrière. D'autres dispositifs d'observations sont encore prévus (carottes, bougies poreuses, météorologie).

Le projet CARPE (Chalk Aquifer Recharge ProcEsses) réunit des chercheurs des deux départements de l'UMR : hydrogéologues, géophysiciens et biogéochimistes. Une dynamique interdisciplinaire a été initiée pour aborder différentes problématiques liés à l'infiltration et la recharge, et aux processus biogéochimiques au sein de la zone

critique (distribution des temps de résidence de l'eau et des solutés, transfert et dégradation des pesticides). Une première thèse a été achevée en 2014 une seconde est en cours depuis Septembre 2016.

Le bassin versant de l'Orgeval

Le bassin versant de l'Orgeval (100 km²), site instrumenté par l'IRSTEA depuis 50 ans et initialement surtout utilisé pour des travaux en hydrologie constitue désormais un site privilégié en Ile-de-France, pour des travaux interdisciplinaires promus par la FIRE -FR 3020- et le programme PIREN-Seine (depuis 2007) et par l'équipement d'excellence Critex (depuis 2012). L'UMR Metis y réalise des travaux en hydro-géophysique et en biogéochimie. C'est sur ce site qu'est développée une modélisation des échanges nappes-rivières, avec une importante implication de l'Ecole des Mines, en mettant en œuvre des observations sur un réseaux de piézomètres équipés de capteurs, ainsi que des mesures géophysiques de caractérisation des propriétés des sols aux interfaces avec les aquifères et les rivières (*FM HGP 1, FM HGP 7*). Cette modélisation hydrologique va à court terme être couplée aux transformations et transferts des éléments biogènes dissous et particulaires (C, N, P) et les formes gazeuses associées. Des expériences et observations sont également menées dans ce sens. Le bassin agricole de l'Orgeval, drainé et cultivé en grandes cultures céréalières constitue également un site de référence représentatif du bassin de la Seine (*FM Biogeo 3*). Les pratiques agricoles y sont analysées en termes de contamination azotée des eaux et de l'atmosphère, de la séquestration du carbone organique dans les sols et des fuites vers l'hydrosystème et sous forme de CO₂, et d'héritage du phosphore. Le modèle Riverstrahler développé à Metis est implémenté sur l'Orgeval au titre de sous-bassin emboîté de la Seine, et des scénarios de changements de pratiques ou système de production agricole y sont explorés (*FM Biogeo 4*).

FM UMR 5 - Intégration dans l'IPSL

L'UMR Metis a contribué à la création du Labex L-IPSL en 2011, et est devenue membre de la fédération IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) en 2014. Ces structures sont principalement consacrées à l'étude du système Terre (et d'autres systèmes planétaires), avec une très importante focalisation sur la problématique du changement climatique. Les apports de l'UMR Metis portent sur deux points principaux : l'intégration de la circulation continentale de l'eau dans la modélisation climatique d'échelle globale et régionale, et l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources environnementales et les circulations (eau, carbone, nutriments) à l'échelle régionale. Nos travaux sur les paléo-environnements continentaux s'intègrent également dans les activités de l'IPSL.

Les chercheurs des deux départements sont impliqués dans l'animation scientifique de l'IPSL et de son Labex. Ils contribuent en particulier au groupe ORCHIDEE (cf *FM HGP 2*) qui pilote les développements du modèle de surface de l'IPSL, avec une participation au projet international CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Phase 6 ; van den Hurk, 2016). ils contribuent à thématique eau du pôle « Climat et environnements régionaux » de l'IPSL et sont membres du CS de l'observatoire SIRTA.

Au sein du labex L-IPSL : ils contribuent aux comités Recherche, Formation, et Innovation, ils contribuent à l'animation du WP4 « Impacts du changement climatique » avec notamment la gestion d'appels à projets (2011-2014), et à la cellule « services climatiques », visant à favoriser l'établissement de services climatiques pour des utilisateurs publics ou privés. Grâce à l'appartenance de l'UMR Metis à ces deux structures, de nombreux projets ont pu être développés.

Dans le domaine de la biogéochimie, trois projets ont été consacrés aux transferts de carbone organique et de nutriments (sur les flux continentaux de gaz à effet de serre, dont l'intégration du COD -carbone organique dissous- dans ORCHIDEE (Lauerwarld et al., 2017), sur la biogéochimie des fleuves de la façade atlantique et sur la modélisation des transferts de nutriments dans les bassins versants et les zones côtières (cf *FM Biogeo 4*). Des travaux sur les paleo-indicateurs (lipides des membranes bactériennes) en milieu continental sont également en cours (*FM Biogeo 7*).

Dans le domaine de l'hydrologie, l'UMR Metis a contribué à cinq projets (cf *FM HGP 2*). Trois d'entre eux ont permis de progresser dans la compréhension des échanges nappes rivière à l'échelle globale (Schneider et al., 2017), comprendre l'influence des nappes souterraines sur le climat (Wang et al., 2016), et montrer l'influence de l'humidité du sol sur le climat (Seneviratne et al., 2013 ; Berg et al., 2016). Dans un projet plus vaste sur les services climatiques, l'UMR Metis a été impliquée sur l'élaboration de projections sur les ressources en eau. Et un dernier projet a été consacré à la reconstitution climatique et hydrologique au 20ième siècle (cf *FM HGP 3*). Enfin, l'UMR Metis s'est impliquée dans un projet consacré aux impacts du changement climatique sur la santé et le coût du travail.

FM UMR 6 - Expertises auprès des grands organismes, des collectivités et de l'industrie

Une majorité des projets de recherche menés au sein de l'UMR Metis trouvent des retombées dans la réponse à des questions que se posent les gestionnaires de l'environnement. Certains programmes structurants pour l'UMR, comme ceux qui sont menés dans le cadre du programme PIREN-Seine ou du GIP Seine-Aval, sont même construits avec les gestionnaires du bassin de la Seine et de son estuaire. Enfin nos travaux que sur le fonctionnement des socio-hydrosystèmes nous amènent à travailler sur les relations entre société et environnement, souvent avec les gestionnaires et acteurs de l'environnement qui sont non seulement partie prenante du système étudié mais aussi souvent partenaires actifs des projets de recherche (*FM UMR 3, FM Biogeo 3, FM HGP 3*).

Les chercheurs de l'UMR s'associent personnellement à cette démarche en étant partie prenante de la vie institutionnelle régionale et nationale dans le domaine de la gestion de l'eau et de l'environnement. Ils sont ainsi membres, voire président(e)s, de plusieurs Conseils Scientifiques d'établissements publics œuvrant dans le domaine de la gestion de l'eau : celui de l'Agence de l'eau Seine-Normandie, celui de l'agence de l'Eau Adour-Garonne, celui de l'ONEMA (aujourd'hui intégré à l'agence française de la biodiversité), celui du SCHAPI en charge des dispositifs de prévision des inondations en France, de la grotte de Lascaux. Récemment, une des membres de l'UMR a été nommée au Conseil National de la Protection de la Nature.

Ils ont également contribué à de nombreuses expertises sur des sujets controversés, notamment l'aéroport de Notre-Dame des Landes, le débat public sur l'aménagement de la plaine de la Bassée, le stockage de déchets de Nonant-le-Pin, actuellement porté devant les juridictions européennes, la catastrophe industrielle AZF. Ils participent à la réflexion stratégique nationale menée sur les sujets environnementaux notamment à l'expertise collective Explore 2070 sur le changement climatique, à l'expertise collective sur les retenues collinaires menées par le ministère de l'environnement, à l'expertise collective sur l'adaptation au changement climatique menée par l'agence de l'eau Seine-Normandie, ou comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée (COMIFER).

FM UMR 7 - Collaborations internationales ciblées sur le long terme

L'UMR a un nombre important de collaborations en Europe en particulier et dans le monde comme en témoigne les publications réalisées avec des co-auteurs travaillant dans des laboratoires à l'étranger (31 % des publications). Deux régions hors Europe font l'objet de collaborations particulièrement soutenues incluant une succession de projets et d'échanges de doctorants. Elles impliquent la majorité des groupes de recherche de Metis.

Les collaborations avec le Vietnam, d'abord avec le Nord du Vietnam et le VAST d'Hanoï depuis 1999 (Académie des Sciences et Technologies), se sont étendues plus récemment au Sud du Vietnam avec l'Université d'Ho Chi Minh. Le modèle Riverstrahler dans son environnement Seneque (par bassin) a fait l'objet de 6 publications (dont 1 en révision) depuis 2014 (en particulier grâce à la thèse de TMH Nguyen). L'étude des sources et du comportement des xénobiotiques (antibiotiques, phtalates) dans les bassins versants a également été structurante car elle a permis de prolonger les relations de l'unité avec le Vietnam. Les thèses de Q.T. Dinh (2012) et B.C. Tran (2013) en particulier ont conduit depuis 2012 à 6 publications (+1 soumise) et des projets de recherche avec Ho Chi Minh City Univ. of Technology (HCMUT) et le Centre Asiatique de Recherche sur l'Eau (CARE) sont en cours de développement pour renforcer ce lien. Outre les aspects, "micropolluants", un projet EC2CO est en cours sur les flux de nutriments avec le CARE.

De fortes collaborations existent aussi en Afrique sub-saharienne avec le Burkina Faso et en particulier l'école d'ingénieurs ZIE à Ouagadougou (reconnue par la CTI française). 4 thèses ont été soutenues en co-encadrement entre ZIE et Metis, 3 à Metis et une au LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique, IPSL). Toutes sont dans le domaine de l'hydrologie au sens large avec des conjugaisons différentes : une application de l'hydrogéophysique en milieu facturé (Soro et al., 2017), un travail de modélisation hydrogéologique d'échelle régionale (Yofe Tirogo, 2016), un travail sur l'impact des évolutions climatiques récentes sur les caractéristiques hydrologiques des bassins versants sub-sahéliens (Nka Nnomo et al., 2015) et les régimes pluviométriques (Ibrahim et al., 2014). Les 4 étudiants avaient obtenu leur master au sein de ZIE. Cette collaboration s'inscrit dans une longue durée évidente, plusieurs des encadrants au sein de ZIE ayant eux-mêmes préparé leurs doctorats au sein de l'UMR Sisyphe (qui précédait Metis). Par ailleurs des enseignants-chercheur de l'UMR consacrent également une partie de leur temps à l'enseignement au sein de ZIE pour des périodes de 1 à 2 semaines par an. L'UMR est aussi impliquée dans le programme ALMIP2 d'inter-comparaison de modèles de surface, qui se focalise sur 3 zones de 1 degré carré au Mali, Niger et Bénin, où les modèles sont comparés entre eux et avec les données fournies par l'observatoire AMMA-CATCH (Grippa et al., 2017). Enfin, un travail avec le Mali consacré aux flux de pesticides a été initié (Maiga et al., 2014).

3. Organisation et vie de l'unité

Pilotage, animation, organisation de l'unité

Parité

Les effectifs de l'UMR Metis sont assez équilibrés avec 52 % de femmes parmi les permanents. Les services de soutien comptent autant de femmes que d'hommes mais celles-ci sont majoritairement intégrées au service de gestion alors que les hommes sont majoritaires dans le service informatique. A court terme, cet état de fait ne peut pas être modifié. L'équipe de direction compte 1 femme et 2 hommes. Le conseil scientifique compte 47 % de femmes.

Instances de pilotage et animation

L'équipe de direction de l'UMR est composée du directeur du laboratoire et des responsables des deux départements (HGP et biogéochimie). Elle se réunit chaque semaine pour traiter des dossiers courants. Le laboratoire dispose d'un conseil de laboratoire et d'un conseil scientifique. Le conseil de laboratoire est composé de l'équipe de direction (le directeur et ses deux adjoints) et de deux membres élus de chacun des collèges chercheurs et enseignants-

chercheurs, ingénieurs et techniciens, doctorants, post-doctorants et ATER. Les membres élus du conseil le sont pour la durée du quinquennal, ils sont remplacés par une nouvelle élection en cas de démission ou de départ. Le directeur peut nommer 3 membres supplémentaires, en particulier, la gestionnaire du laboratoire et membre du conseil de laboratoire. Les doctorants en particulier tournent régulièrement. Le conseil de laboratoire est actuellement composé de 5 femmes et 6 hommes. Le conseil de laboratoire a un rôle consultatif et émet un avis sur toutes les questions relatives à la politique scientifique, la gestion des ressources, l'organisation et le fonctionnement de l'unité. Il se réunit 1 à 2 fois par an. Tous les membres du conseil de laboratoire sont membres du conseil scientifique. Le conseil scientifique est composé de tous les membres du conseil de laboratoire et de membres nommés représentants tous les groupes de l'unité. Il est composé de 21 membres (suppléants compris), 10 femmes et 11 hommes. Le conseil scientifique est compétent pour discuter de tout ce qui concerne la vie scientifique de l'unité, en particulier du budget et des nouveaux équipements à prévoir, des sujets de thèse à déposer, des nouveaux postes à demander auprès de tutelles. Il discute également de l'organisation de la vie scientifique (appel d'offre interne, journée scientifique). Il se réunit 5 à 6 fois par an. Il a été particulièrement impliqué dans la préparation du dossier HCERES. L'assemblée générale du laboratoire se réunit en moyenne 2 fois par an, pour la présentation du bilan de l'année et pour aborder des sujets d'actualité. Elle s'est réunie en particulier pour la préparation de ce document.

Une politique d'animation scientifique plus vigoureuse que par le passé a été mise en place. Une journée scientifique est organisée annuellement. Des exposés et posters présentés par les membres de l'unité permettent de prendre connaissance et de débattre des projets préférentiellement en voie d'achèvement ou en développement. Deux conférenciers invités complètent le dispositif. La dynamique des séminaires de laboratoire a été fortement relancée avec environ 30 séminaires donnés par an. Contrairement à la journée scientifique, une grande partie des séminaires sont donnés par des personnalités extérieures à l'unité, spécifiquement invitées ou en visite dans l'unité à l'occasion de différents projets. Les séminaires donnés par les membres de l'unité viennent compléter les journées scientifiques de l'unité, notamment à l'occasion de présentations dans des colloques, qui peuvent ainsi être préparées pour les jeunes chercheurs, et les autres. Chacun des départements organise également sa journée annuelle. Un appel d'offre interne doté d'environ 15 k€ par an permet de développer des projets nouveaux, la priorité est donnée aux projets pluridisciplinaires. Les propositions reçues (et financées) ont surtout permis de développer des projets entre les différents groupes de chaque département hydrologie et géophysique, microbiologie et géochimie organique, géochimie organique et biogéochimie des nutriments, (développement de capteurs pour le suivi de la hauteur de neige, suivi d'un battement de nappe, par méthodes géophysiques, populations dégradatives de la MO du sol, traceurs lipidiques dans des sols actuels, toxicité des antibiotiques sur les bactéries du sol). Une seule proposition, tirant parti du site atelier de St Martin le Nœud a permis de développer un projet couplant hydrologie et chimie des éléments traces. Une autre forme d'incitation devra être privilégiée dans le futur pour favoriser encore la pluri-disciplinarité.

Protection et sécurité

L'unité est dotée de deux Assistantes de Prévention, l'une d'entre elles étant également Personne Compétente en Radioprotection. Cette petite équipe assure avec efficacité les missions qui lui sont confiées en étroite collaboration avec les services de l'UPMC qui est notre tutelle hôte, et du CNRS. Le document d'évaluation des risques professionnels (EvRP) est régulièrement tenu à jour et les problèmes identifiés progressivement résolus. En cas d'incident, un retour d'expérience est systématiquement organisé avec le concours du CHSCT de l'UPMC et des Ingénieurs Régionaux du CNRS (par le biais de l'application AIE) et des mesures correctives sont prises sur la base des conseils apportés par le CHSCT de l'UPMC (modification de techniques pour la manipulation de produits chimiques, port des équipements de sécurité...).

L'équipement du laboratoire pour la sécurité est amélioré sur le budget de fonctionnement du laboratoire année après année avec notamment une amélioration des conditions de stockages de produits chimiques (dispositifs de renouvellement et de filtration de l'air), un renouvellement des équipements de sécurité des personnes, au laboratoire et aussi sur le terrain, pour les membres de l'unité et les étudiants que nous accueillons pour des stages de terrain (formations de licence et de master). Les arrivants au laboratoire suivent une formation à la sécurité dans les laboratoires en général et les laboratoires de chimie en particulier. Ils obtiennent un certificat à l'issue de cette formation de quelques heures. Nous projetons dans les prochaines années d'étendre cette formation à la sécurité sur le terrain. Ils reçoivent également une information sur bonnes pratiques d'utilisation du matériel informatique qui leur est confié et du réseau, et signent une charte à ce sujet. Les personnes dont la fonction les amènera à acquérir des données reçoivent un cahier de laboratoire. Une dizaine de membres de l'UMR ont une formation de secouriste du travail, tenue à jour, et 2 membres de l'UMR ont suivi une formation spécifique au travail (de terrain) dans des milieux isolés ou extrêmes. Des serre-files/guides sont également présents dans chaque couloir pour l'évacuation des locaux.

Au plan informatique, l'UPMC dédie un VLAN, sécurisé à l'aide d'un pare-feu, pour la gestion du réseau de chaque unité/laboratoire. La sécurité informatique de ce réseau est à la charge de notre service informatique. Le réseau de l'UMR est accessible à des machines (via un VPN géré par l'UPMC) dont la sécurité (mises à jour système et anti-virus) est contrôlée par le service informatique. Un réseau ouvert est accessible par un réseau Wi-Fi principalement pour nos invités et des participants à des réunions. La sécurité (logicielle et matérielle) des serveurs est assurée en interne par le service informatique.

Ethique

Nos thématiques de recherche n'appellent pas à des débats spécifiques sur des questions d'éthique (par exemple nous ne travaillons pas sur des données liées à la santé humaine et ne menons pas d'expérimentation sur l'animal). Nous envisageons l'organisation d'un séminaire de sensibilisation/formation sur les questions d'éthique plus larges dans le monde scientifique (problèmes de sélection des données, de plagiat).

4. Analyse SWOT

Forces

- Existence d'objets d'étude partagés, notamment dans le bassin de la Seine, qui facilitent le développement de projets avancés et pluri-disciplinaires en s'appuyant sur des bases de données, des outils de modélisation développés de longue date, des relations de confiance avec les acteurs du bassin, des structures pour l'organisation de la recherche (PIREN-Seine, GIP-SA, ZA Seine)
- Forte intégration dans plusieurs réseaux collaboratifs, et les sources de financement potentielles associées (IPSL, PIREN-Seine, GIP-SA, ZA-Seine, FIRE, GOEFCAN, OSU Ecce Terra)
- Forte implication dans la vie de la cité, au sein d'instances officielles comme au sein de groupes de réflexion, ce qui facilite le développement de nouveaux sujets de recherche.
- Pluri-disciplinarité en interne, permettant l'approche conjointe d'objets communs : géophysique, hydrologie et hydrogéologie, biogéochimie de la matière organique, des nutriments, des contaminants, histoire
- UMR de taille moyenne, localisée en un seul site, avec des personnels qui se connaissent et se reconnaissent
- Expérience dans le développement de la modélisation dans chacun des domaines/disciplines de recherche de l'UMR, capacité à développer des modèles intégrant plusieurs domaines.
- Implication dans des formations reconnues de longue date qui contribuent à la reconnaissance de l'UMR et à son réseau de relations.

Faiblesses

- Soutien technique trop faible pour certaines activités (développements informatiques, activités de terrain)
- Difficultés à recruter dans l'agglomération parisienne malgré le fort potentiel scientifique (cherté de la vie, qualité de vie), et départ de jeunes chercheurs vers la province
- En raison de la volonté de développer des formations, on aboutit à une surcharge d'enseignement pour un grand nombre d'enseignants-chercheurs, qui pèse sur le temps à consacrer à la recherche
- Volet SHS porté par une seule personne au sein de l'unité, avec cependant de fortes interactions avec les autres disciplines de l'unité (hydrologie, transferts de contaminants, structuration des bassins versants), et un dialogue facilité avec d'autres disciplines SHS. Mais notre position demeure fragile.

Opportunités

- Création de Sorbonne-Université, renforcement des interactions avec les Sciences Humaines et Sociales dans le domaine de l'Archéologie. D'autres partenariats sont à construire (géographie), avec potentiellement à terme accueil/rattachement renforcé d'enseignants-chercheurs en SHS
- la prise en considération de plus en plus forte de problématiques liées aux ressources environnementales (notamment des ressources en eau, en quantité et en qualité), un enjeu sur lequel nous sommes déjà très présents et qui va continuer à se développer.
- Intégration des outils de modélisation maison dans des systèmes plus complets

Menaces

- Appartenance des groupes de recherche de l'UMR à deux COMUE différentes et concurrentes (Sorbonne-Universités et PSL), plus que l'effet double financement potentiel, l'effet centrifuge dû à des développements de projets qui ne pourraient intégrer qu'une partie de l'UMR est à craindre. Par ailleurs, la création des COMUE et autres structures ne facilite pas les collaborations avec des établissements non-associés.
- Le faible taux de succès (pas spécifique à Metis) aux appels à projet Européens et ANR, amène à se focaliser sur les sources de financement différentes. Ces modes de financement permettent de développer des projets en phase avec des questions sociétales, mais pas tous les types de projets que nous revendiquons.
- Complexification des contraintes administratives, sous couvert de meilleur usage de l'argent public.
- Pyramides des âges et départ en retraite prévisibles vont fortement affecter certaines des fonctions supports si les renouvellements nécessaires ne sont pas réalisés
- Fortes difficultés à promouvoir la carrière des MDC et des personnels techniques
- La nouvelle organisation des filières d'enseignement en Master à l'UPMC rend de moins en moins lisibles les thématiques que nous portons en raison de regroupements thématiques destinés à limiter le foisonnement et faire des économies.
- Net affaiblissement du soutien à la recherche de niveau régional dans le domaine de l'environnement

5. Projet scientifique à cinq ans

L'UMR Metis a été créé en 2014, donc encore très récemment, avec pour objectif d'intégrer dans la même unité d'une part des équipes impliquées dans l'analyse et la modélisation du transport de l'eau et des processus qui le contrôlent (hydrologues, hydrogéologues, géophysiciens), et d'autre part des équipes impliquées dans l'analyse et la modélisation du transport et des transformations des éléments biogènes, de la matière organique et des contaminants et des processus qui les contrôlent (géochimistes, biogéochimistes, microbiologistes). Ce regroupement a pour objectif de favoriser les collaborations à l'interface entre ces deux groupes de disciplines, tant il est évident d'une part qu'ils ont besoin l'un de l'autre (dualité traceur/circulation), d'autre part que les interactions entre transport et réactions (microbiologiques, géochimiques...) participent à certains mécanismes de manière active. Cet objectif est conservé pour la prochaine période quinquennale, de même que le positionnement de l'unité dans une recherche qui se veut appliquée, au moins pour une partie, jusqu'à l'implication directe des chercheurs dans des expertises de différents niveaux auprès des gestionnaires de l'environnement.

L'objectif de collaboration entre les deux départements n'a été que faiblement atteint avec un nombre très significatif de projets collaboratifs menés au sein de chaque département entre les différents groupes qui le constituent (voir organigramme fonctionnel), mais encore peu de projets intégrant des chercheurs des deux départements. La politique scientifique qui sera développée pour les prochaines années vise à favoriser ces collaborations. Le principe des incitations financières mis en place au cours de la période en cours devra être dépassé. L'effet d'aubaine créé par l'appel d'offre interne, et relative faiblesse des financements dédiés, n'ont pas apparemment permis l'émergence de projets dans une dynamique de long terme dont on verrait déjà des effets. Pour mieux ancrer la dynamique scientifique de l'unité, quatre projets transverses aux deux départements seront mis en place. Ils s'appuieront sur la dynamique scientifique de chaque département (voir plus loin dans le rapport) et permettront l'ancrage des projets collaboratifs inter-départements dans une dynamique de long terme.

Projet transversal 1. Trajectoires de l'anthropo-écosystème (Laurence Lestel, Florence Habets, Josette Garnier)

Les compétences de l'UMR, au plan technique en particulier, et les recherches que nous menons peuvent soutenir les travaux des gestionnaires de l'environnement, et éclairer ponctuellement certaines décisions: contribution au rapportage sur la qualité de l'eau dans le bassin de la Seine dans le contexte de la DCE, expertise pour la candidature de Paris aux JO 2024, questionnements sur l'implantation de retenues collinaires dans un contexte d'évolution climatique, expertise sur l'exploration post-accident du site AZF... pour ne donner que quelques exemples. Beaucoup de nos activités scientifiques sont menées en interaction étroite avec des gestionnaires de l'environnement (administration nationale et régionale) et des industriels également concernés par l'environnement ; cette proximité facilite les collaborations, et nombre de projets sont construits pour répondre à la fois à des objectifs scientifiques et des besoins opérationnels à plus ou moins long terme.

L'analyse des trajectoires est d'un autre ordre et très centrale pour l'unité. Elle est le lieu de l'utilisation conjointe des connaissances acquises sur l'anthropo-écosystème, et des modèles construits. Elle est aussi un lieu de complétion/confrontation des connaissances auprès de scientifiques d'autres disciplines (SHS en particulier) et avec la société. Cette manière d'envisager l'implication active de l'UMR dans la société et les relations société-environnement offre un positionnement solide en évitant dans une certaine mesure le risque d'instrumentalisation des scientifiques sur des sujets techniques qui ne répondraient qu'aux sollicitations multiples et souvent de court terme de nos partenaires.

Le projet « trajectoires » inclut à la fois l'analyse des trajectoires du passé, et l'étude du futur qui prend la forme de travaux de type prospectif.

Les trajectoires du passé s'appuient sur un intérêt double vers l'histoire environnementale (la société dans ses relations à son environnement) et l'histoire de l'environnement (l'histoire de l'environnement dans lequel se développent les sociétés) ; cette deuxième perspective offre les interactions potentielles les plus fortes avec les scientifiques des sciences de la nature. Ils trouvent dans les situations anciennes des références multiples, les bases de données pour la validation des concepts et modèles et apportent pour l'histoire de l'environnement des méthodes éprouvées dans l'étude de l'actuel. Dans une certaine mesure, l'intégration de données paléontologiques joue un rôle similaire pour la validation de modèles dans des contextes plus anciens, et est pratiquée au sein de l'IPSL. Cette thématique qui vise à l'impact des actions humaines du passé a été mise en œuvre notamment au sein de la Zone Atelier Seine au travers de différents projets sur la morphologie et l'hydrologie passée de la Seine et ses affluents (paysage agricole du moyen-âge, construction pluri-centennale de l'assainissement des villes, corpus ArchiSeine, projet LEFE-VITESSE), sur l'histoire de la qualité de l'eau (projet ANR-MAKARA) et sur l'évolution des héritages des éléments nutritifs dans les sols agricoles (GIP-SA, RESET). D'autres projets en cours concernent la morphologie historique de l'estuaire de la Seine, l'urbanisation des vallées fluviales, la circulation des métaux dans la société et ses traces actuelles.

Vers le futur, le projet de l'UMR Metis sur les trajectoires s'inscrit dans une démarche prospective fondée sur la constitution de scénarios cohérents, tendanciel, de rupture, typés par exemple selon le Millenium Ecosystem Assessment, s'appuyant sur d'autres scénarios et conjugués localement en s'appuyant notamment sur les pratiques émergentes actuelles (signaux faibles) qu'il convient d'identifier et d'explorer, sur des adaptations attendues, etc....

L'exploration des scénarios pour le futur s'appuie sur plusieurs modèles (hydrologiques, agronomiques, biogéochimiques, climatiques...) qui doivent communiquer entre eux, et être adaptés pour intégrer les évolutions de pratiques à simuler (agricoles, assainissement urbain, aménagement des cours d'eau et des vallées ...). Ils intègrent aussi l'effet du changement climatique dans toutes ses dimensions aux plans météorologiques, hydrologiques, biogéochimiques, écologiques... sur les conséquences desquelles une UMR comme Metis et une structure comme la ZA Seine sont de plus en plus sollicitées. Une grande expérience a été acquise au sein de l'UMR Metis concernant la mise en œuvre de ces méthodes sur la partie hydro-agro-alimentaire, le projet devrait naturellement dépasser dans le futur sur l'urbain ses relations avec son Hinterland d'un seul point de vue agricole. En plus d'un travail interdisciplinaire dans lequel les chercheurs deviennent aussi acteurs des relations société-nature qu'ils étudient, ce projet génère aussi des défis pour le développement des modèles de simulation du milieu.

Projet transversal 2. Consolider et intégrer l'effort de modélisation (Vincent Thieu, Agnès Ducharne, Cyril Schamper)

La modélisation et le développement de codes associés sont une activité majeure des deux départements de METIS. Ce projet transversal sera le lieu de la réflexion et de l'organisation de l'effort de modélisation de l'UMR.

Le groupe de géophysique élabore les codes de traitement des données géophysiques collectées, en général, par des méthodes inverses. Des logiciels de traitement comme WuMap font l'objet de mise à niveau et de portage vers de nouveaux langages plus modernes (ex. Python pour la nouvelle version WuMappy). D'autres projets de développement d'interface et d'outils de traitement sous Python sont en cours pour pérenniser les codes de modélisation et d'inversion développés au sein du laboratoire, et favoriser leurs développements par les nouvelles générations de chercheurs, incluant les doctorants. Maintenir et améliorer cette capacité de développement est crucial pour rester pertinent dans l'interprétation des données géophysiques. L'optimisation des codes numériques pour extraire des informations multi-physiques (ex. séparer les effets de conductivité d'électrique de ceux de polarisation ou des propriétés magnétiques) et/ou multidimensionnelles (les prospections d'aujourd'hui donnant de plus en plus d'informations permettant de construire des modèles 3D, par ex. en aéroporté) fait également partie des objectifs de développements numériques.

Le groupe d'hydrologie et hydrogéologie s'attache au développement et au calage de plusieurs modèles hydro(géo)logiques (GR4J, ORCHIDEE, ISBA-SURFEX, MODCOU, Ginette, etc.), ainsi qu'à leur couplage avec d'autres modèles (climatiques, biogéochimiques, socio-économiques). Les simulations hydro-climatiques sont réalisées en collaboration avec MétéoFrance et l'IPSL (co-développement d'ORCHIDEE, intégration de l'eau souterraine à l'échelle globale) bénéficient de moyens de calcul à la fois internes, que l'UMR souhaite continuer à développer (cf description du pôle P9), et externes (mésocentres et moyens nationaux).

Le groupe carbone et nutriments, en collaboration avec la FIRE, développe des modèles de circulation des composés biogéniques (carbone, azote, phosphore, silice, oxygène) dans le continuum terre-mer capables de s'intégrer dans un emboîtement d'échelle allant de la parcelle au continent et sollicite à la fois des solutions de stockage optimisées ainsi que des moyens de calcul de plus en plus importants (concept RiverStrahler, plate-forme pyNUTS). Cette modélisation inclut les éléments sous leurs formes dissoute, particulaire et gazeuses (gaz à effet de serre). Dans tous les cas, un travail indispensable doit porter, non seulement sur l'analyse des contraintes (pressions) mais aussi sur l'analyse des simulations réalisées, qui représentent des volumes de données conséquents par leur nature spatialisée et multi-variée (le modèle Riverstrahler comprend plus d'une vingtaine de variables), et qui repose sur des outils statistiques et géomatiques avancés, y compris en 3D et 4D.

Bien que les structures et objectifs de ces modèles soient assez différents, ils ont en commun un certain nombre de méthodes « numériques » au sens large (calcul direct, inversion et optimisation, méthodes spectrales, statistiques, géomatique, gestion des codes). Le partage d'expérience sur ces méthodes par les différents groupes est indispensable et facilitera la pérennisation de nos codes. Par exemple, des efforts ont été entrepris ces 2 dernières années au sein du groupe de géophysique pour que les développements soient partagés. Le projet transversal valorisera cet effort et permettra de développer une démarche équivalente pour toute l'UMR. L'équipe du projet aura un rôle direct dans le pilotage du pôle technique « modélisation et méthodes numériques ».

Un autre objectif du projet transversal sera de rapprocher certains modèles (couplage hydro(géol)-biogéochimie et/ou hydro-géophysique) en permettant une réflexion sur les formats d'échanges entre nos modèles, et plus généralement sur la stratégie à adopter, plusieurs modèles ou sous-modèles ayant des objectifs similaires parmi tous ceux avec lesquels les chercheurs de l'unité travaillent, qu'ils soient spécifiques à l'UMR ou non. Le projet transversal viendra aussi en appui à des projets pluri-disciplinaires (hydro-géophysique-géochimie) en cours de développement tels que (i) l'utilisation de la polarisation spontanée pour la compréhension des interactions eau-roche (thèse en démarrage) ou (ii) l'exploitation du potentiel de la géophysique pour le suivi de la dépollution des sols (projet de jeune équipe déposé auprès de la ville de Paris) (iii) le développement d'une problématique sur la modélisation transport/géochimie des sites uranifères anciens (en cours de discussion avec AREVA) ou encore (iv) le fonctionnement biogéochimique de l'interface riparien du rû des Avenelles (Orgeval) (en cours dans le cadre du PIREN-Seine) où interviennent conjointement des chercheurs des deux départements. Ainsi, beaucoup de projets récents ou naissants viendront nourrir les travaux de ce projet transversal.

Au-delà de ces problématiques plutôt techniques et néanmoins importantes, le projet sera aussi le lieu de la réflexion sur les problématiques de changement d'échelle inhérentes à (i) l'interdisciplinarité (géophysique, hydrologie, hydrogéologie, biogéochimie...) et (ii) aux échelles auxquelles les données et les questions renvoient pour chaque discipline. Cet effort est en cours (ex : modélisation couplant hydrologie et biogéochimie sous climat changeant, post-doctorat labex L-IPSL), mais le manque de moyens ne permet pas de rendre visible une démarche et des outils pourtant novateurs.

Projet transversal 3. « chantiers partagés » (Danièle Valdes-Lao, Jean-Marie Mouchel, Anne Jost)

L'expérience montre, par exemple au travers de grands réseaux qui nous sont proches tels que celui des Zones Ateliers ou des OHM, et à la toute petite échelle de nos appels d'offre internes, que les chantiers partagés (infrastructure, partage de données, problématiques qui se construisent conjointement) sont un excellent moyen, même s'ils ne sont pas suffisant, pour la mise en œuvre de la pluri-disciplinarité.

Cependant, ces chantiers ne peuvent se développer que s'ils sont nourris par des projets de recherche et promus. L'objectif de ce projet transversal est de consolider le développement des chantiers partagés par une animation scientifique. Les participants à ce projet transversal auront un double mission d'animation et de coordination scientifique et de réflexion sur les moyens à mettre en œuvre, qu'ils soient disponibles au sein de l'UMR ou à rechercher à l'extérieur (collaborations, appels d'offre, labellisation...). Ils pourront notamment s'appuyer sur le pôle instrumentation-terrain qui est en cours de renforcement via le recrutement d'un assistant-ingénieur affecté à ces chantiers par l'OSU Ecce terra.

Plusieurs chantiers sont déjà identifiés, sans exhaustivité, et tous ne sont pas aujourd'hui au même niveau de développement. Il s'agit de (i) la carrière de St Martin le Nœud, chantier porté au sein de l'UMR, (ii) le réseau des exploitations agricoles ABAC (pour Agriculture Biologique - Agriculture Conventioneerelle), chantier porté au sein de l'UMR (iii) le bassin versant de l'Orgeval, en collaboration étroite avec IRSTEA et le GIS Oracle, membres de l'OSU Ecce Terra (iv) le réseau de capteurs de qualité de l'eau PHRESQUES, qui se met en place aujourd'hui au sein de la Zone Atelier Seine.

Par ailleurs, même si la continuité des actions y est plus difficile, nous projetons de consolider également nos activités au Burkina Faso avec ZIE. Pour pallier la forte dépendance des projets, dans un contexte d'éloignement géographique, à l'obtention plus aléatoire de financements, le développement du chantier burkinabe s'appuiera dans un premier temps sur la formation grâce à un projet d'échanges d'étudiants de niveau ingénieur entre les deux écoles d'ingénieur habilitées par la CTI française que sont ZIE et Polytech'Paris avec sa formation aux sciences de la terre dans laquelle est particulièrement impliquée l'UMR Metis. Ces partenaires se sont accordés sur le principe de cette coopération qu'il faudra mettre en œuvre.

Projet transversal 4. Archéométrie (Thanh Thuy Nguyen Tu et Julien Thiesson)

Les deux départements ont une pratique de l'archéométrie, centrée sur l'étude des sites archéologique et de leur environnement (développement de méthodes géophysiques applicables dans des milieux plus ou moins modifiés, développement de méthodes de caractérisation des résidus de bois...). Ces travaux de caractérisation des milieux se rapprochent des méthodes utilisées pour l'actuel et amènent également à décrire des interactions homme-milieu. Il est donc légitime que ces activités soient lisibles à l'échelle de l'ensemble de l'UMR.

La pratique actuelle est de répondre à des demandes très individualisées, chacun des groupes tirant parti de ses réseaux. L'objectif du projet transversal sera d'augmenter la lisibilité de l'archéométrie au sein de l'UMR et de favoriser l'implication plus large de l'UMR dans certains projets archéologiques.

Des conditions nécessaires pour la réalisation du projet

Le projet ne pourra être mise en œuvre que si certaines conditions sont remplies.

D'une part il nous faudra renforcer notre position vis à vis des collectivités locales qui sont essentielles à la fois pour le développement de nos projets et pour leur financement. Si les collaborations avec l'agence de l'Eau et les principaux gestionnaires de l'eau du bassin de la Seine restent excellentes, notamment via le PIREN-Seine et la Zone Atelier Seine, le fort affaiblissement du soutien de la région aux projets environnementaux relativement appliqués pourrait être un problème majeur. Il sera donc important de chercher à renouveler ce soutien par la création d'un nouveau DIM (Domaine d'Intérêt Majeur, les structures de financement de la recherche par la région Ile de France) sur les domaines eau et environnement aquatique. Un appel d'offre pour la création de nouveaux DIM devrait prochainement être lancé, l'UMR Metis prendra l'initiative de ce projet.

Il conviendra également de renforcer notre réseau de collaborations séculaires (mises en place au XXe siècle) notamment avec Mines-ParisTech et IRSTEA (unité HBAN à Antony). Ces collaborations sont intenses depuis de nombreuses années. Elles se sont renforcées dans le cadre du programme PIREN-Seine (dont le directeur est actuellement à Mines-ParisTech) et dans le cadre de l'OSU et ses observatoires du bassin de la Seine (dont l'observatoire Oracle-Orgeval qui est des sites partagés sur lequel nous souhaitons continuer à développer des projets). La convention qui nous liait à Mines-ParisTech pour que des chercheurs puissent être associés à notre UMR devra être reconduite et un document similaire devra être mis en place avec nos collègues d'IRSTEA. Contribuant aux

projets transversaux, ces chercheurs enrichiront notre démarche scientifique dans le domaine des couplages géophysique/hydrogéologie, modélisation couplée, trajectoires, chantiers partagés.

Il convient également de renforcer notre pôle de microbiologie, dont nous avons démontré l'importance considérable au sein du département BIOGEO. Ce pôle ne compte plus aujourd'hui qu'un seul cadre permanent (1 MDC, 1 ATER, 1 Tech). Une nouvelle unité (M2C, Rouen-Caen) est venue rejoindre l'OSU Ecce Terra, ce qui consolide encore les activités que peut mener l'UPMC dans le bassin de la Seine jusqu'à l'estuaire et la zone côtière (contexte PIREN-Seine, ZA Seine). Une convention est en cours de montage pour que deux enseignants-chercheurs microbiologistes de cette unité affectés à l'université de Rouen, et un peu isolés également dans leur unité, puissent s'intégrer partiellement à notre UMR, comme chercheurs associés, au sein du groupe de microbiologie. L'un d'eux était en délégation l'an passé au sein de Metis, l'autre le sera l'année prochaine. Ces interactions ont déjà permis le dépôt de plusieurs projets pluri-disciplinaires sur la thématique dissémination de l'antibiorésistance dans l'environnement et le développement d'observatoires adaptés. D'autres projets concernant notamment les traces des activités humaines du passé sur les résistances, aux antibiotiques et à d'autres éléments et molécules (cf projet trajectoires) sont également en développement.

Dans le contexte des relations inter-institutionnelles, il conviendra également d'accélérer le projet de conventionnement avec l'INRAP pour faciliter les accueils croisés de personnel et l'accès aux sites archéologiques. Cette convention renforcera notre visibilité comme groupe expert en archéométrie.

L'arrivée de Pierpaolo Zuddas, professeur UPMC actuellement membre de l'UMR ISTEP, géochimiste et spécialiste des interactions eau-roche, renforcera nos compétences en géochimie minérale. Avec un de nos jeunes géophysiciens, il porte également un projet d'étude de ces interactions par des méthodes géophysiques (polarisation spontanée notamment), une thèse va être lancée (financement acquis) sur le sujet. Ce travail est une des briques qui nourrira nos réflexions sur la modélisation couplée transport-réaction (projet transversal : consolider et intégrer l'effort de modélisation).

Enfin il reste indispensable d'infléchir positivement la dynamique de promotion de nos agents UPMC notamment. Les taux de promotions observés au sein de l'unité sont très différents selon l'origine des agents. En particulier, il est indispensable que des postes de professeur soient ouverts au sein de l'unité pour la promotion de nos MDC et que la promotion des BIATSS soit aussi accélérée. Nous sollicitons depuis longtemps deux postes de professeur en hydrogéologie et en hydrologie. A échelle de quelques années, c'est aussi de renouvellement d'un poste de professeur de biogéochimie dans le domaine continental qui deviendra indispensable.

Vis à vis du CNRS, nous devons continuer à nous montrer attractifs pour de jeunes chercheurs. Les recrutements les plus récents ont concerné la géophysique, et il serait très important de pouvoir progresser sur ce point en hydrologie et hydrogéologie (actuellement 2 DR dans le domaine et aucun CR) et en biogéochimie (actuellement 2 DR, dont un qui partira à la retraite en cours de mandat, et un CR). A l'EPHE, 3 départs récents (1 DE et 2 MDC) devraient être au moins partiellement renouvelés dans les prochaines années.

Enfin, au plan technique, plusieurs renforcements sont indispensables :

- un ingénieur qui viendra renforcer le pôle modélisation et méthodes numériques et collaborera au projet transversal « Consolider et intégrer l'effort de modélisation »
- un ingénieur ou technicien terrain pour renforcer encore le projet transversal sur les chantiers partagés. Le demi-poste mis à disposition par l'OSU (partagé avec IRSTEA pour l'observatoire Oracle) est une formidable avancée, mais elle ne suffira pas à satisfaire nos ambitions en matière de chantiers partagés.
- un ingénieur électro-technicien, destiné à compenser le départ en retraite d'un ingénieur mécanicien au sein du pôle développement instrumental, tout en ré-orientant les activités du pôle.
- un ingénieur qui viendra compenser le départ (détachement) d'Agnès Derieux, car nous n'avons plus aujourd'hui aucun ingénieur ou chercheur spécialisé dans le développement de méthodes pour l'analyse moléculaire de la matière organique, qui est un des points forts de l'unité.
- enfin, deux départs en retraite au sein de notre équipe de gestion sont prévus à échéance de 6 mois et 2 ans, ils doivent absolument être remplacés faute de quoi l'UMR ne pourra plus fonctionner.

Département Hydro(géo)logie Physique

1. Présentation du département

Introduction

Le département d'Hydro(géo)logie Physique (HGP) a été créé en même temps que l'UMR METIS, en 2014, en fusionnant deux équipes de l'UMR Sisyphe, spécialisées en hydrosociétés et en géophysique environnementale. L'objectif de cette fusion était de renforcer les interactions scientifiques entre l'hydrologie, l'hydrogéologie quantitative et la géophysique, pour étudier plus efficacement les surfaces et interfaces continentales. Dans ce cadre, le principal objectif scientifique du département HGP concerne la caractérisation et la compréhension des processus associés aux transferts hydriques au sein de la « zone critique », c'est-à-dire du sous-sol à l'atmosphère en passant par les différentes interfaces. Le département HGP poursuit aussi des objectifs plus appliqués, qui concernent l'évaluation des impacts anthropiques sur les ressources en eau et les risques hydrologiques, ainsi que le développement d'appareils de mesures géophysiques innovants. Dans ce cadre, nos travaux s'appuient fortement sur les trois pôles techniques de l'UMR, le pôle « développement instrumental », le pôle « terrain », et le pôle « modélisation et calcul ».

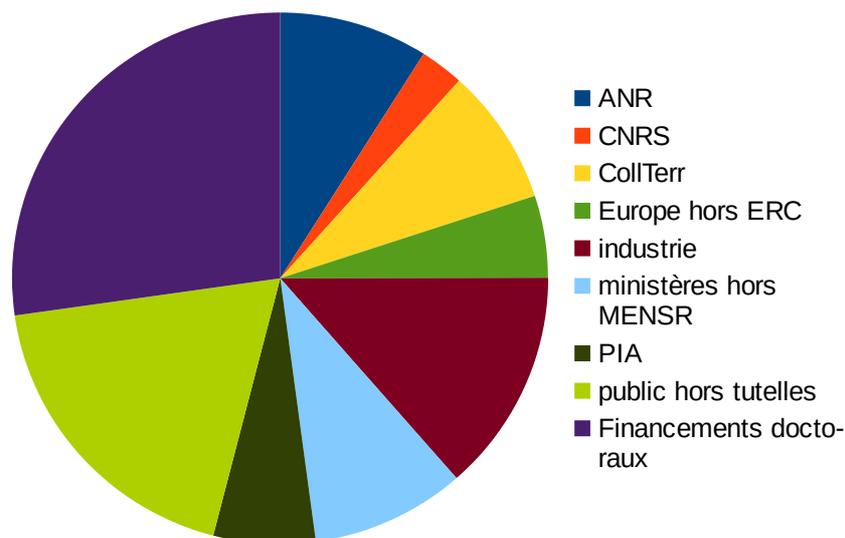
Tableau des effectifs et moyens de l'unité

Le département HGP compte actuellement 36 membres : 19 titulaires, 11 doctorants, 2 post-doctorants, 2 ATER, 2 émérites. Depuis 2012, 34 doctorants ont soutenu leur thèse, et 9 post-doctorants ont été accueillis par le département HGP. Les 19 titulaires comprennent 1 TCH, 1 IE, 10 MCF (3 HDR), 2 CR (1 HDR), 2 DR, 2 PR et 1 Professeur associé. Le pôle « développement instrumental » est intégralement rattaché au département et comprend un IE et un technicien, tous deux en électronique. Le département s'appuie aussi sur deux pôles techniques transversaux, le pôle « terrain » (avec un technicien en métrologie de terrain) et le pôle « modélisation et méthodes numériques ».

Par rapport au précédent quinquennal, l'effectif des titulaires a été réduit d'une personne. Alain Tabbagh (PR) et Pierre Adler (DR), géophysiciens, et Jean Pierre Pencilé (IE en mécanique) sont partis à la retraite. Deux hydrogéologues ont aussi quitté le département en 2014 : Sophie Violette (MCF) qui a rejoint le laboratoire de géologie de l'ENS et Valérie Plagnes (MCF) qui a été détachée dans une entreprise pendant 4 ans et qui revient à Metis à l'été 2017. Les travaux qu'elles portaient, respectivement sur les systèmes volcaniques insulaires dont les Galapagos sont un exemple emblématique, et sur la modélisation des karsts, ont donc peu ou pas progressé. Les départs ont été partiellement compensés par trois recrutements en géophysique : Damien Jougnot et Alexis Mainault (CR), Cyril Schamper (MCF).

Comme souligné dans l'analyse SWOT, le département montre un ratio de rangs A/rangs B proche de 0.25, plutôt faible, qui diminuera encore durant le prochain contrat avec le départ à la retraite de Pierre Ribstein (PR), hydrologue, ce qui justifie nos démarches pour obtenir deux postes de professeur de l'UPMC, en hydrogéologie (en cours) et en géophysique.

Le département HGP bénéficie essentiellement (> 60%) de ressources ministérielles à part à peu près égale entre MENSUR et les autres ministères (voir graphe ci-dessous). La moitié de ces contributions correspondent aux financements doctoraux. Les ANR, les fonds provenant des collectivités territoriales, ainsi que les financements européens (hors ERC) constituent des apports significatifs dans des proportions similaires. La principale spécificité du département HGP est relative à la part significative des fonds provenant de l'industrie (près de 20%) associés aux nombreux contrats d'études scientifiques, qu'ils soient associés à des thèses CIFRE ou pas. Cette particularité dans le paysage des sciences de la terre et de l'environnement est une conséquence de l'importance des activités de recherche du département HGP vis-à-vis des développements méthodologiques numériques et instrumentaux en géophysique de proche surface ou en hydrologie quantitative.



Distribution des ressources dont bénéficie le département HGP au cours de la période 2012-2017

Politique scientifique

Objectifs et missions, axes stratégiques

Les travaux menés au sein du département HGP contribuent au développement des théories et des modèles permettant de décrire, d'analyser, et de comprendre le fonctionnement des hydro-géo-systèmes quelle que soit leur échelle. L'exploitation et la transformation de ces hydro-géo-systèmes par les sociétés ont des conséquences sur notre environnement et sur les sociétés elles-mêmes. C'est sur la base de ces éléments que les thématiques de recherche du département HGP sont établies.

L'activité et la mission du département HGP s'inscrivent dans celles de l'UMR METIS, en favorisant la pluridisciplinarité, en particulier entre hydrosciences et géophysique environnementale. Le département est investi significativement dans le portage de formations initiales au niveau master (4 parcours de M2, une spécialité de M1), ainsi qu'à l'école d'ingénieur Polytech Paris-UPMC au niveau de la spécialité Sciences de la Terre. Le département se distingue également par le nombre et l'importance des contrats de collaborations scientifiques avec les divers acteurs économiques (collectivités, industriels, EPIC,...). Ses membres sont également fortement impliqués dans l'appui à la communauté au travers de nombreuses commissions scientifiques, administratives et d'évaluation de la recherche que ce soit au niveau local (e.g. UPMC), national (e.g. CNU, CNRS), international (e.g. FQRNT Canada).

La stratégie scientifique du département HGP est élaborée en s'appuyant sur ses compétences en modélisation physique, conceptuelle et stochastique pour l'ensemble des disciplines représentées, mais aussi sur une capacité d'imagerie géophysique couvrant quasiment l'ensemble du spectre des méthodes existantes. Elle consiste à soutenir les axes de recherche pluridisciplinaires concernant essentiellement la caractérisation et le fonctionnement des hydro-systèmes en insistant sur la nécessité de quantification des transferts hydriques le long du continuum sous-sol, sol, atmosphère et ce, à différentes échelles de temps et d'espace. Cette stratégie s'appuie sur une animation scientifique spécifique au département, dont l'élément central est l'organisation de journées scientifiques (annuelles). Durant ces journées, résultats et perspectives sur l'ensemble du spectre disciplinaire du département sont présentés, parfois en présence d'extérieurs, invités à co-animer et porter un regard extérieur sur la pertinence des travaux présentés (e.g. Steve Arcone du Cold regions Research and Engineering Laboratory, Etats-Unis, en 2014).

Moyens/méthodes

Le département HGP est adossé à deux pôles qui le supportent techniquement dans ses activités de recherche: le pôle instrumentation et le pôle terrain. Leur rôle est essentiel car idéalement adapté aux spécificités thématiques de recherche du département, en particulier celles consacrées aux développements instrumentaux. Le département bénéficie aussi d'un support technique conséquent sur le bassin de l'Orgeval (sous bassin du Grand Morin), grâce à une collaboration intensive avec Mines ParisTech et avec l'IRSTEA dans le cadre du PIREN Seine. Ce bassin est particulièrement représentatif des bassins sédimentaires sur lesquels l'exploitation agricole est, sur la longue durée,

très importante. Il constitue donc un terrain de jeu adéquat pour les développements méthodologiques de toutes les disciplines du département. En termes de calcul, le département HGP dispose d'un accès privilégié aux ressources de la fédération IPSL (mésocentre IPSL pour stockage, calcul, diffusion de données ; support technique au niveau de l'ICMC, IPSL Climate Modelling Centre). Les moyens de calcul nationaux (IDRIS) sont également sollicités, sur projet. En interne, le pôle « modélisation et calcul » s'est construit lors du dernier quinquennal, grâce des investissements importants consentis par le département (sur projets) et par l'UMR, pour des serveurs de calcul mais aussi pour le stockage et la sécurité des données.

Rayonnement, positionnement

La participation à des projets internationaux constitue une vitrine importante des activités du département (Fonds de recherche Nature et Technologie - Canada, projet Panta Rhei de l'IAHS, CMIP Phase 6 du WCRP - World Climate Research Programme). Le département HGP accueille aussi depuis 2 ans la « Darcy lecture » proposée par la NGWA (National GroundWater Association), ce qui constitue une reconnaissance internationale de la pertinence de ses actions scientifiques.

Il faut noter que le département HGP constitue le plus important contingent de géophysiciens de sub-surface en France (actuellement 11 membres) et anime depuis plus de 15 ans le réseau national GEOFCAN (Approche GEOphysique et structurale de l'organisation spatiale et du Fonctionnement des Couvertures pédologiques Anthropisées et Naturelles) dont l'objectif est de rassembler l'ensemble des compétences et des connaissances pratiques et théoriques dans le domaine de la géophysique environnementale. La visibilité de ce groupe s'est traduite en sollicitation pour organiser des congrès internationaux sur les thèmes de recherche majeurs du département, par exemple le NSG2012 - 18th European meeting of Environmental and Engineering Geophysics of the Near Surface division of EAGE, 3-5 Septembre 2012, ou le 3rd International Workshop on Induced Polarization, Avril 2014.

2. Produits de la recherche et activités de recherche

Bilan scientifique

Le projet scientifique élaboré pour notre précédente évaluation quinquennale (en 2012) s'articulait autour de quatre thématiques complémentaires, reprises ci-dessous. Elles traduisent notre ambition de développer les compétences spécifiques des hydrologues, hydrogéologues et géophysiciens qui composent le département, mais aussi de les intégrer au service d'une meilleure compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes et de ses évolutions (dans le passé et dans le futur).

Développement instrumental en géophysique de subsurface

L'élaboration de nouveaux concepts et leur mise en œuvre instrumentale sont les seuls moyens d'accéder à des mesures géophysiques plus précises et plus exhaustives. Le département HGP a poursuivi les développements (uniques en Europe) d'appareils électrostatiques pour la mesure de la résistivité électrique du sous-sol par contact capacitif, particulièrement adapté lorsque l'état de surface ne permet pas l'implantation d'électrode métallique dans le sol (en particulier en milieu urbain, Flageul et al., 2013). L'imagerie géophysique de territoire à la méso-échelle ne peut se faire qu'à travers des données satellitaires ou aéroportées. Afin d'accéder à cet ordre de couverture spatiale, le département est impliqué depuis 2013 dans la conception d'un dispositif géophysique multi-capteurs aéroporté sur avion léger (projet TEMas) destiné à mesurer la résistivité électrique du sous-sol sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Ces travaux devraient déboucher sur le premier prototype TDEM aéroporté (Time Domain ElectroMagnetism) tracté sur avion léger (cf. FM6).

Caractérisation des surfaces et interfaces continentales

Les travaux du département cherchent à mieux caractériser l'hétérogénéité des propriétés des hydro(géo)systèmes depuis des échelles locales (géométrie, propriétés en 3D) jusqu'à des échelles régionales voire continentales (organisation des unités paysagères, géomorphologie et émergence de motifs spatiaux tels que les réseaux hydrographiques). L'étude de la « zone critique » fait notamment l'objet d'intenses travaux au sein du département HGP. Cet espace est assimilé à une zone d'activités hydriques, géochimiques et biologiques importante. Les travaux sur la zone critique en géophysique de sub-surface s'appuient sur l'Equipex CRITEX (Equipements géophysiques innovants sur un réseau de bassins versants) avec le développement original d'une sismique environnementale s'appuyant sur l'exploitation des ondes de surface (Pasquet et al., 2015).

L'étude des transferts en milieu karstique fait l'objet de nombreux travaux couplant approches hydrodynamiques et géochimiques dans des contextes variés : le calcaire du Crétacé du bassin aquitain (Briand et al. 2013), les calcaires karstifiés du Dogger en Bourgogne (Delbart et al. 2014a, 2014b, 2016) ou encore la craie Normande (Valdés et al. 2014). Toujours en milieu carbonaté, mais peu karstifié, l'observation pluridisciplinaire de la zone critique de la craie picarde dans la carrière de Saint Martin le Nœud a permis d'améliorer notre compréhension des processus de transfert de l'eau et des solutés dans la zone non saturée de la craie (Barhoum et al., 2014).

La caractérisation géométrique de l'hydrosystème constitué par le bassin de Seine et ses sous bassins est aussi très intégratrice d'un point de vue disciplinaire au sein du département HGP. Ces travaux sont effectués majoritairement dans le cadre du programme PIREN-Seine. La spatialisation géophysique de l'information géologique et hydrogéologique a fait l'objet de travaux originaux (Mouhri et al., 2013) qui ont permis d'établir une meilleure caractérisation de l'aquifère superficiel de Brie à l'échelle régionale, de sa variabilité interne à l'échelle du sous-bassin des Avenelles et du type de connectivité de cet aquifère avec le réseau hydrographique. Aux échelles régionales et continentales, de nombreux travaux ont concerné la description de la variabilité sous-maille pour différentes problématiques : hétérogénéité du couvert neigeux ou glaciaire (thèses C. Magand, 2014, et P.S. Gsell, 2014), mitage urbain (thèse B. Salvati, 2015), caractérisation fine de la densité des cours d'eau à l'échelle globale (Schneider et al., 2017). Le recours à des données satellitaires pour mieux caractériser les milieux s'est également développé (cf. FM5).

Modèles et processus: continuum eaux souterraines/eau de surface/atmosphère

Le département a poursuivi ses travaux dédiés à la modélisation des hydrosystèmes continentaux. Les dynamiques impliquées concernent des échelles de temps et d'espace très variées (de l'échelle locale du milieu poreux jusqu'à l'échelle continentale, et de l'échelle temporelle propre aux processus représentés jusqu'à des échelles séculaires). Cette diversité d'objectifs et d'échelles nécessite différents niveaux de conceptualisation des processus ainsi qu'une réflexion sur le changement d'échelles. A ce titre, le département est reconnu pour ses développements de modèles hydrogéologiques à de multiples échelles (cf. FM2). Une question importante dans ce cadre est la quantification des échanges nappe-rivière et l'impact de ces échanges sur le fonctionnement hydrogéologique à différentes échelles (e.g. Rivière et al., 2014), qui a été abordée dans le bassin de la Seine durant la dernière phase (Phase 6) du programme PIREN Seine, en bénéficiant des apports de l'hydrogéophysique (Mouhri et al., 2013). Le département HGP est aussi très impliqué dans le développement des modèles de bilan d'eau et d'énergie, quel que soit le type d'occupation en surface (agriculture, forêt, urbain, etc.) ou le type de contexte climatique (milieux de montagne, arides). Il a fortement contribué aux récents développements méthodologiques sur les modèles conceptuels adaptés à l'échelle régionale (10-1000 km²), en particulier sur les procédures d'optimisation des paramètres permettant des simulations dites multi-objectif et sur de nouvelles approches de détermination des paramètres pour les bassins ne disposant pas de données hydrométriques (bassins dits non jaugés). A l'échelle continentale, ces travaux s'illustrent en particulier par l'exploitation du modèle de surface ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems) de l'IPSL pour comprendre les couplages surface/atmosphère (e.g. Cheruy et al., 2014 ; Berg et al., 2016).

Impacts anthropiques sur les hydrosystèmes et le climat

Les interactions de l'homme avec les hydrosystèmes sont nombreuses, difficiles à quantifier à l'actuel, dans le passé et plus encore dans le futur. L'essentiel des problématiques envisagées dans le projet 2012 ont été effectivement abordées (pompages, occupation des sols, changement climatique, aménagements hydrauliques). Ces travaux ont été menés dans des contextes géographiques variés, avec des problématiques environnementales elles aussi variées, comme détaillé en FM3. Nous nous sommes aussi beaucoup impliqués pour le transfert des connaissances ainsi acquises vers la société, qu'il s'agisse des services de l'état ou d'entreprises (FM4).

Données chiffrées

Le département a publié 5 papiers dans des journaux généralistes à grand impact (voir tableaux suivants). Ses deux domaines majeurs de publication sont les ressources en eau (32 %) et la géophysique (26%) qui reflètent bien les thématiques du département. On note globalement une majorité de papiers dans les revues du 1er quartile (64.8 %) surtout en hydrologie où les articles sont publiés dans les meilleures revues (Advances in water resources, Hydrology and Earth System Sciences, Water resources research et Journal of Hydrology). En géophysique, plus de revues sont dans le deuxième quartile mais tout de même de très bonnes revues comme Geophysical Research Letters et Remote sensing in Environment ou Earth and Planetary Science letters.

| Revues | n | Q |
|---|----|---|
| Nature Communications | 1 | 1 |
| Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America | 1 | 1 |
| Scientific Reports | 2 | 1 |
| Journal of Hydrology | 22 | 1 |
| Hydrology and Earth System Sciences | 13 | 1 |
| Physical Review E | 9 | 1 |
| Hydrological Sciences Journal | 9 | 1 |
| Water Resources Research | 8 | 1 |

| | | |
|---------------------------------|---|---|
| Geoscientific Model Development | 7 | 1 |
| Journal of Hydrometeorology | 6 | 1 |
| Geophysical Research Letters | 6 | 1 |
| Climate of the Past | 6 | 1 |
| Hydrogeology Journal | 5 | 1 |
| Hydrological Processes | 5 | 1 |
| Nature Climate Change | 4 | 1 |
| Advances in Water Resources | 4 | 1 |
| Remote Sensing of Environment | 3 | 1 |

| | | |
|--|----|---|
| Science of the Total Environment | 3 | 1 |
| Earth and Planetary Science Letters | 3 | 1 |
| Geoderma | 3 | 1 |
| Journal of Geophysical Research: Atmospheres | 3 | 1 |
| Marine and Petroleum Geology | 3 | 1 |
| Geophysics | 12 | 2 |
| Journal of Applied Geophysics | 8 | 2 |
| Geophysical Journal International | 7 | 2 |
| Geophysical Prospecting | 4 | 2 |
| Near Surface Geophysics | 9 | 3 |
| Archaeological Prospection | 4 | 3 |
| La Houille Blanche | 3 | 4 |

| Domaines de publication | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 |
|----------------------------|----|----|----|----|
| Multidisciplinary sciences | 4 | | | |
| Water resources | 64 | 1 | 1 | 3 |
| Geosciences | 16 | 1 | 5 | 2 |
| Meteo and atmospheric | 16 | | | |

| | | | | |
|-------------------------------|----|----|----|--|
| sciences | | | | |
| Environmental sciences | 12 | | | |
| Geochemistry and Geophysics | 10 | 35 | 11 | |
| Physics, mathematical | 9 | | | |
| Engineering geological | 4 | | | |
| Soil science | 3 | | | |
| Engineering, petroleum | 2 | | | |
| Physical geography | 2 | | | |
| Mining and mineral processing | 1 | 8 | | |
| Agronomy | 1 | | | |
| Engineering, chemical | | 2 | | |
| Remote sensing | | 2 | | |
| Mechanics | | 1 | | |
| Geology | | 1 | | |
| Physical chemistry | | 1 | | |
| Engineering civil | | 1 | | |
| Analytical chemistry | | 1 | | |

Faits marquants

FM HGP 1 - Nouveaux développements sur les transferts en hydrogéophysique

Les méthodes géophysiques mises en œuvre depuis des années au sein du laboratoire METIS ont fait leur preuve pour l'imagerie des structures de sub-surface et sont d'ores et déjà matures et largement utilisées en recherche fondamentale et dans le domaine appliqué. Durant ces dernières années, notamment avec l'arrivée de deux Chargés de Recherche du CNRS, une voie de recherche complémentaire a émergé au sein du département HGP, qui vise à améliorer notre capacité à observer et comprendre les flux et les processus dynamiques dans la sub-surface. Cette approche intégratrice hydrogéophysique vise principalement les flux hydriques (Jougnot et al., 2015 ; Pasquet et al., 2016 ; Konosavsky et al., soumis), le transport de solutés (Maineult et al., 2015) ou encore les réactions biogéochimiques (Li et al., 2016 ; Leroy et al., 2017) à partir de mesures géophysiques, notamment électriques et sismiques. En particulier, la méthode de la polarisation provoquée spectrale a fait l'objet d'avancées importantes au sein du laboratoire, impliquant le développement de nouveaux modèles physiques (e.g., Abdulsamad 2017), de méthodes de changement d'échelles (Maineult et al., 2017 et soumis) et d'expériences en laboratoire permettant de relier les mesurables géophysiques aux propriétés d'intérêt hydrogéologique et biogéochimique. Une autre idée est de faire de la géophysique en 4D, i.e. de l'imagerie 3D « classique » en y ajoutant la dimension temporelle afin de suivre l'évolution des processus de la proche surface. Cette approche hydrogéophysique est celle qui est notamment développée dans le cadre de l'ITN (Innovative Training Network) ENIGMA (European training Network for in situ imaging of dynamic processes in heterogeneous subsurface environments : <https://enigma-itn.eu/>) débuté en janvier 2017, financé par l'Europe et dont METIS est co-coordonateur.

FM HGP 2 - Développements de modèles hydrogéologiques : de l'échelle locale jusqu'à l'échelle continentale

Le département HGP contribue à l'élaboration et au développement de modèles hydrogéologiques, depuis l'échelle de Darcy pour l'étude des processus en milieu poreux (code thermo-hydrrique Ginette, pour l'étude de la déconnexion nappe-rivière, Rivière et al., 2014 et des processus de gel/dégel, Rivière et al., soumis ; projet Interfrost, Grenier et al., soumis) ou pour une mise en œuvre régionale (code Eau-Dyssée, Thierion et al., 2012, en collaboration avec Mines ParisTech). Le dernier quinquennal a aussi vu l'émergence de plusieurs projets portés par le département, ciblés sur la modélisation des aquifères, notamment de l'échelle régionale à continentale. Une première action est le développement de la plateforme de modélisation régionale AQUI-FR, qui intègre 13 modèles régionaux distribués et 6 modèles karstiques conceptuels, en collaboration avec le Cerfacs (coupleur OpenPALM), le BRGM, Mines ParisTech, Météo-France, Géosciences Rennes, le LHyGeS et l'AFB. Plusieurs actions ont aussi porté sur la modélisation des eaux souterraines dans les modèles de surface des modèles climatiques français, dont la vocation est d'être déployés à l'échelle globale (ISBA-TRIP, Vergnes et al., 2012, 2014 ; ORCHIDEE, Ringeval et al., 2012 ; Campoy et al., 2013 ; projets LEFE GEM et ANR IGEM : Impact of Groundwater in Earth System Models ; thèse d'Ana Schneider, 2017). Dans ce cadre, l'objectif est de décrire l'effet tampon des aquifères sur les débits mais aussi les zones où les remontées capillaires peuvent soutenir l'humidité du sol et l'évapotranspiration et influencer la production végétale et le climat (baisse de température, augmentation des précipitations). Le projet ANR IGEM a notamment permis d'organiser un

workshop international sur la modélisation des eaux souterraines dans les modèles de climat en octobre 2016 avec 40 personnes, dont la moitié d'étrangers.

FM HGP 3 - Impacts hydrologiques de la variabilité climatique et des pressions anthropiques

Les hydrosystèmes sont soumis à des variabilités climatiques intrinsèques qui s'étalent sur une très large gamme de fréquences : cycles diurnes, saisonniers, pluriannuels (ENSO, NAO, etc.), auxquelles se superposent des variabilités induites par les activités humaines (climat, occupation du sol, etc.). L'analyse de ces variabilités et de leurs impacts sur le fonctionnement hydrologique en période historique est un préalable essentiel à l'identification et à l'attribution des tendances actuelles et futures. En rétrospectif, nos travaux se sont ciblés sur la période industrielle (depuis la fin du XIX^e siècle) et ont porté sur la détermination des impacts de variabilités à différentes échelles de temps : cycles infra-annuels spécifiques aux composantes nivales et glaciaires sur les bassins versants de montagne (Gsell, 2014 ; Magand et al., 2014 ; Riboust et al., 2017), cycles et variabilités pluriannuels (oscillation atlantique multi-décennale Boé et Habets, 2014 ; variabilité décennale de la mousson ouest-africaine, Nka et al., 2016 ; Tirogo et al., 2016). En prospectif, l'étude des impacts hydrologiques du changement climatique futur reste un thème très structurant au sein du département HGP, avec des applications récentes en France, en Amazonie (Guimberteau et al., 2013) et en Afrique de l'Ouest (Roudier et al., 2014). Un effort important a été porté sur les développements méthodologiques, notamment la quantification des incertitudes (Habets et al., 2013 ; Vidal et al., 2015), la recherche de contraintes émergentes pour les réduire (Boisier et al., 2015), la transférabilité des paramètres des modèles hydrologiques en contexte non stationnaire (Brigode et al. 2013c ; Magand et al., 2015), le rôle des couplages sol/atmosphère dans l'amplification future de l'aridité (Seneviratne et al. 2013 ; Berg et al., 2015, 2016). D'autres développements ont porté sur les liens avec les activités humaines et l'adaptation, en particulier autour de l'avenir des retenues d'eau (Habets et al., 2014 ; Sauquet et al., 2016). Enfin, nous nous sommes aussi intéressés aux impacts hydrologiques des changements d'occupation des terres : mitage péri-urbain (Salvati et al., 2015, 2016), déforestation (Sterling et al., 2012) et aux impacts croisés de la déforestation et du changement climatique, ce dernier ressortant comme la pression dominante sur l'hydrologie de l'Amazonie au XXI^e siècle (Guimberteau et al., 2017).

FM HGP 4 - Hydrologie appliquée : de la recherche à la gestion des territoires

Les connaissances acquises depuis plus de 10 ans sur les impacts du changement climatique ont fait l'objet d'un transfert vers des travaux plus opérationnels, notamment le projet Explore 2070 porté par le Ministère de l'Ecologie pour l'adaptation des grands bassins français. Plus récemment, le département a fortement contribué à une expertise sur l'hydrologie de la Seine mettant en avant l'intérêt des mesures d'hydraulique douce (visant à augmenter l'infiltration par des éléments paysagers comme les bandes enherbées). L'ensemble de ces activités s'est traduit par l'élaboration d'une stratégie d'adaptation au changement climatique du bassin de la Seine, votée en 2016. Le département est également impliqué dans l'encadrement de plusieurs thèses en partenariat avec des acteurs industriels ou institutionnels de la gestion de l'eau. Deux thèses concernent la gestion du risque d'inondation en partenariat avec le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (thèse en cours de F. Alonso sur le développement de modèles de prévision de crue) et avec AXA (thèse en cours de C. Rebolho sur la prévision des zones inondées à l'échelle d'un linéaire hydrographique). Un partenariat fort existe avec EDF qui se concrétise par deux thèses en bourses CIFRE sur les aménagements hydroélectriques : thèse de P. Brigode soutenue en 2014 sur la prédétermination de débits de crues pour le dimensionnement d'ouvrages, thèse en cours de L. Rouhier sur la détermination des apports hydrologiques spatialisés à l'échelle de chaînes de production hydroélectrique.

FM HGP 5 - Emergence de travaux autour de la télédétection spatiale

Certaines données spatiales sont maintenant d'usage courant en hydrologie, notamment les MNT pour caractériser les réseaux hydrographiques (Schneider et al., 2017) ou la gravimétrie spatiale pour l'évaluation des modèles hydrologiques de grande échelle (Vergnes et al., 2012, 2014 ; Guimberteau et al., 2014). Nous nous sommes aussi intéressés à des observables plus nouveaux, comme par exemple l'étendue du manteau neigeux (MODIS) pour améliorer la modélisation dynamique de la neige (Magand et al., 2014). Dans le cadre d'une thèse avec l'INRA de Bordeaux, nous avons pu proposer la première évaluation du produit d'humidité de surface SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity, mission ESA/CNES) à l'échelle globale, avec des performances au moins équivalentes aux autres produits spatiaux actuellement disponibles par comparaison aux données in situ (Al Yaari et al., 2014a,b, 2015). Ces performances justifient l'exploitation des observations satellitaires d'humidité de surface pour améliorer les modèles (stress hydrique à l'évapotranspiration, lien entre l'absence d'irrigation dans les modèles de climat et certains biais chauds systématiques), dans le cadre de projets ESA et TOSCA/CNES en cours. Nous sommes aussi impliqués dans la préparation de la mission d'altimétrie à large fauchée SWOT qui pourrait révolutionner l'hydrologie des grands fleuves (Haefliger et al., 2015 ; David et al., 2016), en collaboration avec Mines ParisTech, IRSTEA, M2C à Caen (tous dans l'OSU EcceTerra) et le LSCE (IPSL). Cette dynamique autour de l'observation spatiale de la Terre bénéficie du soutien technique apporté par la fédération FIRE en géomatique et de l'implication d'Agnès Ducharne comme présidente du groupe « Surface Continentales » du programme TOSCA du CNES depuis 2014.

FM HGP 6 - Le FUI TEMas airborne geophysics

L'imagerie géophysique 3D haute résolution à la méso échelle est actuellement quasi inexistante (hormis le dispositif SKYTEM, Univ. Aarhus). Le projet « TEMas » (2013-2017) est financé par le pôle de compétitivité PEGASE (2,5 M€, associé au Fond Unitaire Interministériel). Il a pour objectif la conception d'un dispositif géophysique aéroporté sur

avion léger destiné à la mesure de la résistivité électrique du sous-sol par méthode électromagnétique dans le domaine temporel (TDEM). Ce projet est porté scientifiquement par METIS (responsable des spécifications et de la validation géophysique) en collaboration avec 3 industriels : Action Air Environnement (AAE) en tant qu'avionneur et leader industriel du FUI, intégrateur et leader industriel du programme ; NERYS pour la fabrication de l'électronique de réception ; BRIGHTLOOP pour la fabrication de l'émission de puissance. Le BRGM est impliqué pour l'optimisation de la chaîne de traitement des données opérationnelles. Les vols d'essais sont prometteurs mais le risque principal concerne l'homologation des vols par les autorités, fortement contrainte par la sécurisation du dispositif en vol. Il s'agit donc d'aboutir au premier dispositif TDEM aéroporté « low-cost », dispositif qui mettrait à portée de la communauté scientifique des sciences de la Terre et de l'environnement au sens large des moyens d'imagerie de la résistivité électrique du sous-sol à l'échelle régionale et sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Ce projet a déjà donné lieu à la soumission par AAE de 4 brevets mondiaux temporaires (Russie, Chine, Europe, Inde) concernant les aspects aérodynamiques, en particulier les correcteurs d'assiettes et l'accrochage en vol du dispositif connecté.

FM HGP 7 - Sismique environnementale

Porosité, saturation et perméabilité sont des propriétés de la zone critique (ZC) qui naturellement influencent le signal sismique. Estimer le rapport des vitesses de propagation des ondes de compression (VP) et de cisaillement (VS) dans la Terre donne un moyen indirect d'en évaluer la teneur en fluide. Cette approche, bien connue de divers domaines des géosciences, reste sous-exploitée en géophysique de subsurface. Pourtant, la tomographie de temps d'arrivée des ondes P et l'inversion de la dispersion des ondes de surface (Bodet et al., 2014) peuvent être combinées pour produire des sections 2D de VP et VS à partir d'une seule acquisition. A travers la prise en charge de la tâche « sismique » de l'Equipex CRITEX, avec l'appui du PIREN-Seine et par l'encadrement d'une thèse UPMC (2011-14), le département HGP a adapté, testé et validé cette stratégie. Sur les hydrosystèmes de Ploemeur (SOERE H+) et de l'Orgeval (SOERE RBV), il a été possible d'extraire des variations spatiales de VP/VS, dont l'évolution s'est confirmée liée aux teneurs en eau observées localement (Bodet et al., 2015 ; Pasquet et al., 2015a,b). Des expériences de laboratoire (Pasquet et al., 2016) et de terrain (Dangeard et al., 2016) proposent actuellement d'appliquer ces travaux au suivi temporel de la zone non saturée sur les observatoires de la ZC, ainsi qu'à l'étude des processus qu'elle renferme. Cette démarche, récemment encouragée par la communauté « hydrogéophysique » (Research Highlights of Vadose Zone Journal, sept. 2016), est actuellement soutenue par une thèse UPMC (2015-18), par la phase 7 du PIREN-Seine, par CRITEX et l'infrastructure de recherche OZCAR. La sismique « environnementale », telle qu'elle est développée par HGP, s'intègre au projet européen (ITN) ENIGMA à travers notamment la responsabilité d'une thèse (2017-2020).

3. Analyse SWOT

Forces

- Le département HGP dispose d'une expertise reconnue au croisement de trois disciplines essentielles pour l'étude de la zone critique : géophysique de proche surface, hydrologie et hydrogéologie.
- Nous disposons aussi de compétences fortes en modélisation et développement instrumental en géophysique.
- La production scientifique du département HGP est fondée sur une fraction importante de publications où le laboratoire est porteur (par opposition à contributeur), ce qui n'empêche pas pour autant les collaborations. Ceci montre que l'équipe attire les compétences nécessaires au développement et à la diversification de son activité plus qu'elle ne prête ses « services » aux recherches d'autrui.
- Le laboratoire est très impliqué dans les formations scientifiques de l'UPMC, notamment Polytech Paris-UPMC, le Master SDUEE (Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie), et la Licence de Sciences de la Terre qui sont des exutoires naturels pour les compétences scientifiques du laboratoire. L'équipe peut s'appuyer sur les formations pour asseoir sa visibilité et son savoir-faire.
- Le transfert est rapide des connaissances produites par l'équipe vers la société civile. 0,32 cm

Faiblesses

- Le nombre de portage de projets académiques nationaux (ANR, EC2CO, etc.), institutionnels (ADEME, etc.), et surtout européens (H2020, ERC, etc.) est trop faible pour l'équipe HGP, même si le nombre de participations est très honorable.
- Il y a encore peu de publications entre hydrogéologues et géophysiciens.
- L'équipe HGP doit encore mûrir ses capacités à cerner les sujets, les opportunités et les réseaux sur lesquels se pencher pour faire évoluer ses thématiques scientifiques sans effet de foisonnement, source potentielle de dilution des efforts.
- Le personnel technique est en nombre insuffisant pour mener des travaux de terrain, l'optimisation des développements en modélisation et la conception des développements instrumentaux.
- Au niveau national et international, la géophysique de sub-surface (environnementale) rassemble une communauté assez petite et donc peu visible face à la géophysique profonde, voire avec la géologie, ce qui ne permet pas de faire apparaître sa spécificité scientifique (voir par exemple dans Web of Sciences où elle est dans Geochemistry & Geophysics).

Opportunités

- HGP est au carrefour de l'hydro-géo-physique avec un fort potentiel d'innovation.
- L'existence de plusieurs structures fédératives (IPSL, OSU, FIRE, PIREN) doit nous permettre de développer encore notre interdisciplinarité.
- La création de Sorbonne Université rapproche la faculté des sciences avec les SHS, où HGP a toute légitimité en raison de son approche de questions sociétales et historiques. Cela valorise notamment les travaux rattachés à l'archéologie et à la géographie physique.

Menaces

- La nouvelle structuration qui va remplacer le Master SDUEE donnera moins de visibilité et de lisibilité aux disciplines portées par le département HGP, comme hydrogéologie, géophysique de sub-surface, géotechnique et va donc diminuer l'attractivité pour les scientifiques, stagiaires, doctorants, voire post-doctorants.
- Dans Sorbonne Université, la communauté des surfaces continentales est petite comparée à celles des sciences du climat et des sciences de la Terre.
- Le départ à la retraite de nos professeurs et directeurs de recherche continue. Sans recrutement en catégorie A, nous manquerons de cadres ayant l'expérience et l'ancienneté suffisante pour prendre des responsabilités d'enseignement, d'animation et de développement de nouvelles recherches.
- Les perspectives de carrière pour les agents, qu'il s'agisse des ITA ou des enseignants chercheurs, ne sont pas bonnes et constituent une menace pour la pérennité du département.

4. Projet scientifique à cinq ans

Notre projet s'inscrit dans la continuité des orientations impulsées au sein du département depuis la création de METIS en 2014. Nous approfondirons bien sûr les travaux qui font notre force autour de la modélisation hydrologique et de la géophysique de sub-surface qui nous ancrent fortement dans la communauté nationale (OZCAR/CRITEX, H+, PIREN-Seine, IPSL, IRSTEA, Météo-France, BRGM, etc.) et internationale (e.g. HOBE au Danemark, CZO aux Etats-Unis, CMIP6). Nous ferons aussi fructifier les efforts engagés ces dernières années pour renforcer la complémentarité des approches hydrologique et géophysique, qu'il s'agisse de méthodes numériques ou de chantiers partagés. Pour plus de lisibilité, nous avons légèrement modifié le nom du département en :

Département « Hydrologie, hydrogéologie et géophysique de sub-surface » (H²GS²)

Hydrogéophysique

Une de nos ambitions majeures est de développer l'hydrogéophysique, au sein du département et au-delà, car il nous semble que cette démarche qui combine des méthodes d'investigation non destructives (géophysique de sub-surface voire télédétection) avec de la modélisation est particulièrement adaptée pour affiner la compréhension des hydrosystèmes continentaux, naturels et anthropisés, qui se caractérisent par une structure et des écoulements complexes, quelle que soit l'échelle considérée.

Cette démarche sera principalement mise en œuvre pour l'étude de la zone non-saturée et, plus largement de la zone critique (notamment dans le cadre de chantiers liés en particulier à CRITEX/OZCAR), qui constitue un axe majeur du département HGP. La problématique est double : (i) développer des méthodes géophysiques permettant une description fine des différents compartiments de circulation de l'eau et (ii) utiliser ces observables pour mieux quantifier les flux. Un objectif majeur est de permettre la description fine, à partir d'observables géophysiques, de l'épaisseur de la zone altérée et de la zone non-saturée, de la teneur en eau (profils de saturation), des écoulements et transferts de masse, voire des phénomènes de biodégradation. Ceci impliquera d'utiliser la plupart des méthodes géophysiques développées par le département. Un enjeu très fort porte sur la caractérisation des circulations d'eau, désormais accessibles en plus de la distribution statique de l'eau grâce aux méthodes sismiques et du potentiel spontané, et aux développements de suivis temporels. La compréhension des observables géophysiques et leurs relations avec les paramètres hydrodynamiques, ainsi que la validation des modèles théoriques, nécessite encore des travaux de simulation numérique, des études en laboratoire sur des systèmes analogues à l'échelle métrique et contrôlés, ainsi que des études de terrain sur sites des réseaux nationaux et européens. Les sites et chantiers où cette démarche est explorée sont multiples, afin de refléter des contextes variés (hydrosystèmes continus ou discontinus dans des environnements alluviaux, cristallins ou karstiques, voire agropédologiques).

Nous poursuivrons notamment les collaborations engagées sur le site exceptionnel de la carrière souterraine de Saint-Martin-le-Nœud, qui permet d'étudier les transferts (eau et contaminants agricoles) et les processus biogéochimiques de la surface jusqu'à la nappe, fédérant ainsi les différents groupes thématiques de l'unité (hydrologues, biogéochimistes et géophysiciens). Ce site étant maintenant bien instrumenté, il faudra caractériser de façon fine les processus d'infiltration et les processus biogéochimiques en surface et leur couplage, les processus de recharge, le transfert et la dégradation des pesticides, le rôle des argiles, et l'hétérogénéité spatiale des écoulements dans la zone non-saturée. Les signatures hydrogéophysiques des infiltrations et des processus d'altération de la craie seront explorées à l'aide notamment des méthodes électriques, électromagnétiques basse fréquence (EM) et sismiques à différentes échelles.

Dans le cadre du programme PIREN-Seine, plusieurs études multi-méthodes seront déployées sur le bassin versant expérimental de l'Orgeval dans l'objectif d'une interprétation couplée des données pour la spatialisation des paramètres hydrodynamiques et thermiques de la zone critique, notamment le long du réseau hydrologique et aux interfaces (nappe-rivière, continuum sol-aquifère). Sur le site de la Bassée, en collaboration avec Mines ParisTech, nous intégrerons à la modélisation hydrogéologique de la plaine la caractérisation géophysique de l'hétérogénéité spatiale des dépôts et les mesures *in situ* de pression et température dans les eaux de surface et souterraines (dispositif expérimental aujourd'hui opérationnel, à associer aux données des partenaires VNF et SGL). Nous explorerons sur ce même site le potentiel des futures observations d'altimétrie satellitaire (mission SWOT) pour estimer les variations temporelles du stock d'eau dans la plaine alluviale à partir des niveaux des gravières (projet TOSCA SPAWET).

Développements pour la géophysique de sub-surface

Le département a une longue tradition de développement méthodologique et donc instrumental. L'outil géophysique est le seul à permettre une investigation non destructive et « complète » d'un milieu sur une large gamme d'échelles géométriques. Cette orientation a vocation à perdurer sur le long terme. Les questions de recherche qui se posent sont différentes selon les méthodes. Des travaux sont encore à mener sur :

- **les méthodes magnétiques** : la mesure et la cartographie fines du signal magnétique des sols et leur capacité à étendre la compréhension spatiale d'un système nécessitera de faire progresser le matériel d'acquisition et la façon de traiter et combiner les données (collaboration avec l'INRAP et l'IRSTEA).
- **les méthodes électromagnétiques** : concernant l'inversion à l'avancement des dispositifs systèmes de mesures TDEM tractés pour la caractérisation des propriétés électromagnétique du sous sol (convention en cours avec l'entreprise américaine Zonge), avec comme objectif de déterminer à la fois la conductivité électrique (liée à la teneur en argiles) et la viscosité magnétique (dépendant des processus de pédogénèse), pour mieux cartographier les sols.
- **la méthode de tomographie électrique** : en particulier, son application à des sites de type archéologique, sols pollués ou milieu urbain nécessitera du développement instrumental et méthodologique, concernant notamment le traitement des artefacts (par exemple 2D en 1D et 3D en 2D) et la représentation des données.
- **la méthode de la polarisation provoquée temporelle et spectrale** : il reste encore beaucoup à faire concernant les méthodes de traitement des données, notamment en temporel.
- **la méthode du potentiel spontané** : cette méthode peut être utilisée pour le suivi des flux hydriques dans la proche surface, et tout particulièrement lors de l'infiltration d'épisodes pluvieux. La collaboration avec l'Université de Copenhague se poursuivra à travers un suivi de longue durée (plus de 5 ans de données) sur le site agricole de Voulund (www.hobe.dk). Cette méthode est actuellement à l'étude pour le suivi de l'évapotranspiration dans un des Critical Zone Observatories (Boulder Creek, Colorado) à travers une collaboration avec Kamini Singha de la Colorado School of Mines.
- **la sismique environnementale** : développée pour l'hydrogéologie actuellement (hétérogénéités de la sub-surface, imagerie de la zone saturée, estimation de conditions aux limites pour l'hydrodynamique), elle devra être proposée comme un outil hydrogéophysique à part entière. Il s'agira également de construire de nouvelles approches exploitant pleinement la richesse du signal sismique (dispersion, atténuation, contenu fréquentiel), tant dans le domaine actif que passif. Il faudra développer des dispositifs d'acquisition et de suivi adaptés, notamment à travers des coopérations industrielles.

Un autre type de mesures qui s'est récemment développé dans le département est l'utilisation de la géophysique aéroportée, qui permet en effet une spatialisation des mesures à méso-échelle. En particulier le projet TEMAS a permis de réaliser un outil d'acquisition de mesures électromagnétiques (avec des partenaires privés et le BRGM). Ce travail continuera dans le futur. Dans le même ordre d'idées, on effectuera une étude de faisabilité de mesures magnétiques à l'aide de drones, en simulant les réponses et en optimisant la calibration des capteurs, les trajectoires de vol et le traitement des données.

Au-delà des applications hydrologiques déjà mentionnées dans le paragraphe précédent sur l'Hydrogéophysique, ces méthodes d'investigation des milieux seront aussi mobilisées dans de nouveaux champs disciplinaires comme l'agronomie ou l'archéométrie-archéologie (cf. projet de l'UMR METIS).

Par ailleurs, le traitement des mesures et leur interprétation imposent aussi de nouveaux développements. En particulier, l'interprétation des observables nécessite de connaître les relations pétrophysiques permettant de passer des propriétés physiques mesurées aux caractéristiques recherchées du milieu. Ainsi, concernant la sismique, il faudra construire des modèles pétrophysiques alternatifs pour lier les paramètres sismiques aux propriétés hydrodynamiques de la zone non saturée. Il faudra faire de même concernant les paramètres issus des mesures de polarisation provoquée, et aussi entre température, conductivité électrique et permittivité complexe. L'interprétation nécessite de faire de la modélisation directe, une fois ces relations pétrophysiques connues. Une attention particulière sera portée à la modélisation couplée des mesures hyperfréquences que sont la TDR et le radar, et à la modélisation multi-

échelle (du pore au terrain) des mesures de polarisation provoquée. Enfin, la modélisation directe est une porte d'entrée nécessaire à l'inversion des données, i.e., la conversion des observables en paramètres géologiques ou hydrologiques. Il reste encore beaucoup à faire dans ce domaine, notamment pour ce qui concerne l'inversion des données électromagnétiques dans les domaines temporel et fréquentiel ou encore les inversions intégratives de différentes méthodes, comme la sismique avec l'électrique.

Modélisation de la zone critique

Notre démarche est d'exploiter des modèles pour (i) comprendre des phénomènes hydrologiques et géophysiques complexes (en utilisant les modèles pour explorer numériquement diverses hypothèses de fonctionnement), et (ii) élaborer des prédictions et des inversions fiables de leur comportement. Ce travail nécessite un gros effort de développement et d'intégration, qu'il s'agisse de modèles spécialisés sur tel ou tel processus, ou bien de méthodes de transfert d'échelles.

De l'échelle du pore à celle de la parcelle

L'interprétation des mesures de terrain (signal géophysique, flux hydriques) nécessite de comprendre ce qui se passe à une échelle plus petite, que ce soit celle de l'échantillon (ou du moins du volume élémentaire représentatif), celle du pore ou de la micro-fracture. Cette compréhension passe donc par une modélisation à «petite» échelle, suivie de procédures de changement d'échelle pour arriver progressivement à celle du terrain. Cela peut aussi nécessiter des mesures sur échantillons en laboratoire, dans une optique de validation des modélisations petite échelle. On s'intéressera en particulier :

- au développement de modèles pétrophysiques et de changement d'échelle, au croisement de la géophysique, de l'hydrogéologie et de la biologie, pour la compréhension des processus dynamiques de la subsurface, avec des expérimentations sur modèles réduits;
- à l'étude des phénomènes de polarisation à l'échelle du pore (polarisation de la couche de Stern, polarisation de membrane et polarisation de Maxwell-Wagner), avec leur modélisation par éléments finis (incluant la résolution des équations de Nernst-Poisson-Boltzmann), l'étude du changement d'échelle réalisé aux moyens de simulations sur réseaux de tubes ainsi que sa validation par mesures sur échantillons;
- au développement d'un « simulateur de milieux poreux » par réseaux de tubes pour étudier le changement d'échelle de la perméabilité, du facteur de formation, du potentiel spontané et de la polarisation, en milieux saturés et partiellement saturés.

De l'échelle de la parcelle à l'échelle continentale

A ces échelles, un objectif majeur concernera la représentation spatiale et temporelle judicieuse des processus hydrologiques et des paramètres qui les contrôlent. Deux directions complémentaires seront privilégiées, la description de la variabilité « sous-maille » par des modèles adaptés, et l'exploitation de la richesse des données spatialisées actuellement disponibles (y compris les données issues de télédétection ou de modèles spécialisés). Cette démarche nous semble essentielle pour tenir compte de l'influence des activités humaines sur les processus hydrologiques, qui est présente sur tous les territoires et en perpétuelle mutation, comme détaillé en #4. Elle sera déployée à travers une large gamme de modèles (hydrologiques, hydrogéologiques, hydrauliques et couplant le plus souvent ces différents processus), appliqués sur des domaines de taille variée, depuis les petites échelles (modèle hydro-thermique Ginette) jusqu'aux applications planétaires (modèle de surface ORCHIDEE de l'IPSL), en passant par les bassins versants (GR4J) s'agrégeant à l'échelle nationale (Aqui-FR).

Dans ce cadre, une problématique très fédératrice au sein du département concerne la façon dont les interactions surface-souterrain modulent les bilans d'eau et les écoulements. Elle peut se décliner de façon très opérationnelle autour de l'hydraulique douce ou de l'influence de l'imperméabilisation urbaine sur les crues, mais elle se retrouve aussi par exemple derrière le « paradoxe sahélien » (la remontée des nappes lors de la sécheresse des années 1970-2000 s'explique par la baisse du couvert végétal, qui a augmenté le ruissellement, lequel se concentre au Sahel dans des mares où les nappes se rechargent). Les difficultés sont de bien décrire la partition entre ruissellement et infiltration et le lien entre infiltration et recharge, qui sont modulés d'une part par la profondeur de la nappe et les relations nappe-rivière, mais aussi par l'évapotranspiration et des écoulements horizontaux associés à des processus de réinfiltration à petite échelle (micro-reliefs, flaques, mares, zones humides) qui sont très difficiles à observer. Plusieurs thèses et projets sont engagés pour améliorer la représentation de ces processus en s'appuyant sur des données locales (débits, piézométrie, température de l'eau, conductivité électrique) et spatialisées à diverses échelles (imagerie géophysique, topographie, occupation des sols et urbanisation, humidité de surface satellite) : modèles GR4J (thèse 2017-2020 de M. Saadi sur les effets de l'urbanisation) et ORCHIDEE (thèse 2017-2020 de S. Tafasca en collaboration avec les pédologues de IEES-Paris, thèse 2015-2018 de A. Tootchi et projet ANR I-GEM sur l'impact des eaux souterraines sur les zones humides et le climat, projet TOSCA-SMOS, PI Y. Kerr, CESBIO ; Soil Parameter MIP, PI M. Cuntz, INRA Nancy ; ESA-CMUG2 soumis, PI JL Dufresne, IPSL). Nous poursuivrons aussi les travaux sur la modélisation des karsts, qui montrent une réponse surface-souterrain très spécifique et très hétérogène spatialement, notamment dans le cadre de la plateforme Aqui-FR, en collaboration avec le BRGM.

La démarche de spatialisation présentée ci-dessus sera aussi appliquée à la modélisation hydraulique des cours d'eau. Pour augmenter la fiabilité des modèles hydrauliques, il est important de pouvoir décrire la variabilité des grandeurs géométriques et hydrauliques (largeur et débit de plein bord, pente, rugosité) le long du linéaire hydrographique. Cette information manquant encore de manière systématique à haute résolution, nous essayons de développer une modélisation de ces grandeurs en combinant les contraintes physiques (hydraulique) avec les régularités/périodicités qui émergent à des échelles plus grossières ou à haute résolution sur des biefs densément instrumentés. Cette démarche pourra trouver une application dans le cadre de la mission spatiale SWOT (Surface Water and Ocean Topography, mission NASA/CNES prévue pour 2020) pour améliorer l'inversion des mesures altimétriques fournies sur des biefs de 1 à 10 km en données de débit.

Nous continuerons enfin la modélisation des transferts couplés d'eau et de chaleur dans le manteau neigeux et dans les aquifères. Dans le premier cas, le but est d'assimiler des observations ponctuelles (comme par exemple les hauteurs de neige) à l'échelle de bassins versants méso-échelle, ce qui nécessite de développer des méthodes mathématiques particulières, comme les méthodes spectrales de résolution des Equations au Dérivées Partielles (EDPs), afin de garder des coûts de calcul raisonnables. Le développement du modèle numérique Ginette, couplant l'équation du transport de chaleur à celle de la diffusivité en milieu poreux, se poursuivra dans le cadre du projet d'intercomparaison Interfrost (projet dirigé par le LSCE impliquant une quinzaine de codes hydro-thermiques européens et américains), avec une attention particulière au cas des milieux gelés non saturés, en collaboration avec Mines ParisTech. Pour ce faire, nous chercherons des ressources pour réaliser des expérimentations en chambre froide, mettant en jeu l'application de méthodes géophysiques pour le suivi des teneurs en eau liquide/solide (hydrogéophysique de laboratoire).

Renforcement du pôle « modélisation et méthodes numériques »

Les compétences en modélisation sont suffisamment riches et diverses au sein du département pour justifier une animation scientifique et un partage d'expertise autour des méthodes numériques. Le but est d'impliquer l'ensemble de notre communauté (EC/C, IT, doctorants) pour échanger et développer des collaborations internes sur des verrous techniques importants, comme les problèmes inverses (inversion du signal géophysique, calibration de paramètres, assimilation de données) ou les méthodes de transfert d'échelle (paramètres efficaces, modélisation sous-maille, stochastique, spectrale). Cette animation impliquera notamment des séminaires avec des experts d'autres laboratoires (IPSL, IRSTEA, IGE, CESBIO, Géosciences Rennes, etc.).

Un autre axe du pôle sera de favoriser des activités de modélisation transversales avec le département BIOGEO, puisque les modèles hydrodynamiques du département HGP ont vocation à intégrer des transferts de matières. On aimerait ainsi intégrer des pollutions dans la plateforme Aquif-FR, par exemple de type agricole, pour appréhender la contamination des hydrosystèmes. En parallèle, le transfert du carbone organique dissous vient d'être développé dans le modèle ORCHIDEE et devrait se poursuivre avec le transfert de chaleur pour décrire la température des cours d'eau et des lacs (projet TOSCA SPAWET avec le LCSE, Mines-ParisTech et l'université de Tours). Ceci permettra d'intégrer les transformations biogéochimiques du carbone, en collaboration avec nos collègues du département BIOGEO, ce qui renforcerait considérablement la modélisation du cycle du carbone dans le modèle de climat de l'IPSL.

Ces activités impliquent de renforcer nos moyens de calcul par des achats de matériel mutualisés entre les deux départements de METIS, en tenant compte de la « subsidiarité » avec l'IPSL. Des moyens humains sont également nécessaires et notre priorité est un IE avec un profil de maintenance des codes, support aux développements, mise en œuvre et analyse de simulations, pour contribuer aux développements d'ORCHIDEE, Aquif-FR et PyNUTS, et favoriser leur enrichissement réciproque.

Trajectoires hydro-climatiques

Cet axe s'appuie sur les modèles que nous développons pour simuler le fonctionnement hydrologique des hydrosystèmes continentaux et de la Zone Critique. En lien avec le projet transversal « Trajectoires » du projet d'UMR, notre objectif spécifique est de comprendre et quantifier les interactions entre ce fonctionnement hydrologique (processus, mais aussi ressources en eau et risques, dont crues et sécheresses) et les changements environnementaux, qu'ils soient globaux comme le changement climatique ou régionaux comme l'urbanisation ou l'irrigation. Comme par le passé, nous accorderons une attention particulière à l'évolution des eaux souterraines, sur lesquelles nous disposons d'une expertise forte, mais aussi parce qu'elles jouent un rôle crucial pour la résilience des hydrosystèmes, tant face aux extrêmes (crue et sécheresse) qu'à l'aridification qui est anticipée en conséquence du changement climatique dans de nombreuses régions du globe. Une évolution importante, en revanche, sera de nous intéresser davantage aux trajectoires historiques, importantes pour comprendre les dynamiques anthropiques, et aux prévisions à court terme.

Dans le cadre du projet Aquif-FR, nous visons ainsi à exploiter les caractéristiques des eaux souterraines (persistance donc effet mémoire importants) pour réaliser des prévisions à court terme et saisonnières des stocks et flux souterrains afin de donner des informations pour une bonne gestion de la ressource en eau. Cela entraîne un grand nombre de problématiques « amont », notamment l'assimilation de données piézométrique et les karsts (cf. #3b,c). Des travaux de reconstruction hydro-climatique sur le xx^e siècle (projet Labex L-IPSL, en collaboration avec le Cerfacs) visent à tester la capacité des modèles à reproduire les variabilités climatiques passées, à intégrer les évolutions de l'occupation des sols et des aménagements et à en quantifier les impacts, ce qui est utile pour interpréter les

projections climatiques. En parallèle, pour prévoir les changements hydrologiques provoqués par une urbanisation future, nous chercherons à mieux décrire les impacts hydrologiques de l'urbanisation passée, pour pouvoir exploiter des scénarios d'urbanisation future (la « ville de demain » est un des axes prioritaires du nouvel Institut de la Transition Environnementale - ITE - de Sorbonne Universités).

En ce qui concerne le changement climatique, nous prévoyons de développer des projets sur la vulnérabilité des ressources en eau en Afrique de l'Ouest, un des chantiers principaux du Labex L-IPSL (collaboration avec ZiE au Burkina Faso, notamment à travers l'échange et le co-encadrement d'étudiants, mais aussi avec AFD, ACF, UNESCO...). Les rétroactions positives entre fonte du permafrost, production de méthane et réchauffement seront aussi examinées à l'échelle planétaire, à l'aide du modèle ORCHIDEE couplé au modèle de climat de l'IPSL (collaboration LSCE et IGE). Enfin, dans le cadre du centre de modélisation du climat de l'IPSL (ICMC), nous participerons au programme CMIP6 d'inter-comparaison des projections du climat du futur, avec des actions spécifiques sur le rôle des couplages surface-atmosphère et des paramètres hydrodynamiques du sol sur la sensibilité climatique (i.e. l'intensité du réchauffement climatique pour un forçage radiatif donné). L'influence particulière des eaux souterraines sur cette sensibilité climatique et sur l'évolution des ressources en eau globales sera examinée dans le cadre du projet ANR IGEM. Un objectif à terme sera aussi d'intégrer les pompes souterraines dans ce modèle ORCHIDEE, en collaboration avec Yoshi Wada (IIASA, Autriche).

Une difficulté récurrente quand on s'intéresse aux évolutions du cycle de l'eau et des ressources associées concerne l'empreinte des activités humaines. Les études rétrospectives nous montrent qu'elle est forte, même si elle est souvent difficile à caractériser avec précision, mais elle est surtout très difficile à anticiper dans le futur. Les travaux menés dans le cadre du département BIOGEO et du projet transversal « Trajectoires » de l'UMR sur la perception des milieux « naturels » par la société et sur les mesures de gestion environnementale pour leur restauration apportent des informations essentielles dans ce cadre. Nous essaierons de trouver des moyens auprès de programmes de recherche interdisciplinaires (PIREN-Seine, ITE/SU, GICC s'il est maintenu, voire ANR) pour développer des projets spécifiques sur cette boucle de rétroaction sociale autour des liens entre crues et aménagements d'une part, irrigation et changement climatique d'autre part.

Département Biogéochimie

1. Présentation du département

Introduction

Le département de Biogéochimie de METIS a été construit à partir de deux équipes de l'UMR Sisyphe (« Biogéochimie des éléments nutritifs » et « Chimie des micropolluants organiques ») et de l'équipe « Géochimie organique et minérale de l'environnement » (GOME) de l'UMR BioEMCo. Il est entièrement localisé autour de la rotonde 56, 4ème étage du campus Jussieu où il occupe, en partie, 3 couloirs.

Tableau des effectifs et moyens de l'unité

Le département de Biogéochimie compte actuellement 38 membres : 22 titulaires, 7 doctorants, 2 post-doctorants, 2 ATER, 2 émérites, 2 personnels techniques en CDD et un professeur en accueil. Depuis 2013, 14 doctorants ont soutenu leur thèse. Les 22 titulaires appartiennent aux 3 tutelles de l'UMR (5 CNRS, 11 UPMC et 6 EPHE plus 1 DECU) et comprennent 1 ADT, 4 T, 1 AI, 2 IE, 9 MCF (1 HDR), 1 CR (HDR), 3 DR, 1 Pr. Les 5 pôles techniques « chimie des nutriments » (1 AI et 1 T UPMC), « géochimie minérale » (1 T UPMC), « géochimie organique » (1 IE CNRS), « chimie des contaminants » (1 IE, 1 T et 1 ADT EPHE) et « microbiologie environnementale » (1 T UPMC) font partie intégrante du département qui s'appuie également sur le pôle transversal « instrumentation terrain ». Nous bénéficions aussi du soutien d'un ADT UPMC de l'OSU (partagé entre 3 UMR) pour la préparation d'échantillons.

Par rapport au précédent quinquennat, l'effectif global a diminué de 5 personnes, affectant l'ensemble des groupes de recherche du département. Ainsi, dans le groupe « Chimie des contaminants » qui est entièrement porté par des personnels EPHE, 1 DE et 2 MCF sont partis à la retraite entre 2015 et 2017. Ces départs ne sont pas compensés par le recrutement en 2014 d'un MCF qui développe une thématique nouvelle (écotoxicologie) et la nomination d'un DR CNRS de l'équipe au titre de DECU (2016). De plus, une T doit partir également en retraite à la fin 2017. Le recrutement d'un MCF chimiste dans ce groupe est indispensable, notamment pour assurer la responsabilité scientifique du pôle technique. Le départ en 2013 d'un CR du groupe « carbone et nutriments » a été partiellement compensé par le recrutement en 2012 d'un MCF mais un DR (actuellement émérite) est parti à la retraite en 2015. La modélisation biogéochimique du continuum Terre-Mer et les nombreux projets dans lesquels ce groupe est impliqué ne pourront être menés à bien sans le recrutement d'un CR en modélisation biogéochimique. En géochimie organique, 2 chimistes organiciennes (1 CR et 1 IR-HDR) CNRS sont parties en retraite en 2013 et 2014. Les développements analytiques qu'elles portaient avaient pu reprendre grâce à l'arrivée en Noemi d'une IR en 2015, mais cette dernière est maintenant en détachement au Musée du Louvre depuis mai 2017. Or, la position de leader en géochimie organique dépend grandement de notre capacité à développer de nouvelles approches pour analyser la matière organique naturelle. Enfin, les 2 personnes (1 CR et 1 IR CNRS) qui constituaient initialement le groupe de microbiologie ont quitté METIS en mutation en 2014 et 2017 tandis qu'une ADT (depuis promue T) l'a rejoint en 2012. L'arrivée en 2016 d'une MCF permet d'envisager à nouveau une dynamique positive d'autant plus qu'une Pr microbiologiste est actuellement en accueil à METIS. Une demande d'association la concernant est à l'étude, ainsi que pour un de ses collègues MCF.

Les ressources du département comprennent pour un quart les financements doctoraux, qui associés aux autres soutiens ministériels représentent 65 % du budget du département. On note en particulier une forte participation de l'UPMC aux pôles analytiques « chimie des contaminants » et « géochimie organique » via la plateforme de « géochimie organique » de l'OSU. L'autre point remarquable est la contribution importante (16 %) des collectivités territoriales qui traduit la forte application sociétale des travaux menés dans le département. L'ANR apporte la moitié des autres financements qui se répartissent ensuite également entre le CNRS et l'Europe.

Politique scientifique

Le département étant ancré dans des compétences disciplinaires fortes, son projet comprenait des projets disciplinaires, mais il avait surtout l'ambition de profiter de la présence conjointe de ces compétences pour développer des projets transversaux. Afin de favoriser l'intégration de l'équipe GOME dans le département et d'inciter les échanges entre les équipes précédemment existantes, nous n'avons pas souhaité créer d'équipes au sein du département même si les compétences disciplinaires continuaient à être portées par les anciennes équipes. Les activités du département s'appuient sur des moyens analytiques conséquents répartis dans 4 pôles analytiques. Le groupe de chimie des contaminants est l'un des deux en France à étudier la présence dans l'air de perturbateurs endocriniens, et ses thématiques se sont récemment élargies à l'écotoxicologie pour lequel il est déjà reconnu, comme le montre la nomination récente d'une de ses MCF au Conseil National de la Protection de la Nature. De manière générale, les membres du département sont impliqués dans de nombreuses commissions au niveau national (INEE, INSU, EPHE, CNRS, CNES, MEDDE, ...). Les travaux du département sont également largement reconnus au

niveau international, notamment en ce qui concerne les modélisations biogéochimiques, les caractérisations moléculaires de la matière organique ou l'utilisation de marqueurs organiques pour des reconstructions paléoenvironnementales, comme en témoignent les implications dans des comités éditoriaux (Limnology and Oceanography, Organic Geochemistry, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis) et la participation à des projets européens (ERANET, ITN-H2020, programmes Hubert Curien, ERC) en collaboration avec les meilleurs acteurs de la discipline.

La répartition globale des activités entre production de connaissance, activités de valorisation et de transfert, appui à la communauté pour le département est de 60/19/21. On note toutefois une certaine variabilité entre les groupes de recherche, la production de connaissances représentant de 40 à 80 % de l'activité.

2. Produits de la recherche et activités de recherche

Bilan scientifique

Les tableaux ci-dessous montrent qu'outre 6 publications dans les grandes revues généralistes, nous publions dans une large gamme de domaines, ce qui reflète nos activités à l'interface entre disciplines. Toutefois, logiquement, c'est en « Sciences de l'environnement » et en « Géochimie » que se situent la majorité (54 %) de nos articles. Dans ces différents domaines, nous privilégions les meilleures revues (Agriculture, Ecosystems & Environment, Geochimica et Cosmochimica Acta, Water Research), avec plus de 60 % des articles sont dans le 1er quartile du domaine concerné. On peut toutefois noter une assez forte production (13 articles) dans Environmental Science and Pollution Research qui correspond à des numéros spéciaux suite à des congrès.

| Domaines de publication | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 |
|-------------------------------|-------|-----|------|-----|
| Multidisciplinary sciences | 5 | | | |
| Environmental sciences | 49 | 43 | 4 | |
| Geochemistry and Geophysics | 21 | 1 | 1 | |
| Geosciences | 12 | 2 | 2 | |
| Water resources | 11 | 7 | | |
| Agriculture | 9 | 1 | | 4 |
| Marine and freshwater biology | 9 | 1 | | |
| Analytical chemistry | 8 | 4 | | |
| Soil science | 2 | 3 | 3 | |
| Plant science | 2 | 1 | | |
| Food science and technology | 2 | | | |
| Ecology | 1 | 2 | | |
| microbiology | 1 | | 1 | |
| Limnology | 1 | | | 2 |
| Biology | 1 | | 1 | |
| Physical geography | 1 | | | |
| Agronomy | 1 | | | |
| Engineering, chemical | | 1 | | |
| Astronomy and astrophysics | | 1 | | |
| | 61,5% | 30% | 5,5% | 3 % |

| Revues | n | Quartile |
|---|----|----------|
| Nature | 2 | 1 |
| PLoS ONE | 1 | 1 |
| Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America | 1 | 1 |
| Scientific Reports | 1 | 1 |
| Nature Geoscience | 1 | 1 |
| Organic Geochemistry | 13 | 1 |
| Science of the Total Environment | 13 | 1 |
| Environmental Science and Pollution Research | 13 | 2 |
| Biogeochemistry | 9 | 1 |
| Environmental Research Letters | 7 | 1 |
| Agriculture, Ecosystems & Environment | 7 | 1 |
| Biogeosciences | 6 | 1 |
| Geochimica et Cosmochimica Acta | 5 | 1 |
| Regional Environmental Change | 5 | 2 |
| Chemosphere | 4 | 1 |
| Journal of Analytical and Applied Pyrolysis | 4 | 1 |
| Journal of Marine Systems | 4 | 1 |
| Archives of Environmental Contamination and Toxicology | 4 | 2 |
| Global Biogeochemical Cycles | 3 | 1 |
| Hydrological Processes | 3 | 1 |
| Water Research | 3 | 1 |
| Nutrient Cycling in Agroecosystems | 3 | 1 |
| Environmental Chemistry | 3 | 2 |
| Environmental Science & Policy | 3 | 2 |
| Meteoritics & Planetary Science | 3 | 2 |

Le projet du département Biogéochimie comprenait des projets disciplinaires en géochimie organique, chimie des micropolluants et microbiologie environnementale mais également des projets transversaux sur les cycles biogéochimiques et leurs couplages, le rôle de la matière organique dans le devenir des micropolluants, ou répondant à des défis sociétaux tels que la gestion pour une bonne qualité de l'eau et des sols et une agriculture durable compatible avec les besoins des populations. Ces aspects sont repris ci-dessous en mettant surtout l'accent sur les activités qui ne sont pas détaillées dans les faits marquants.

Microbiologie environnementale

Cette thématique s'est révélée être au cœur de plusieurs projets en interaction avec les trois autres groupes du département, comme décrit en *FM Biogeo 1*. En parallèle, les microbiologistes de METIS assurent le maintien et la caractérisation d'un souchier de bactéries dénitrifiantes et ont développé des travaux en écotoxicologie microbienne (Roose-Amsaleg et al., 2013, Roose-Amsaleg et Laverman, 2015, Laverman et al 2015). Par exemple, un résultat

important est que les antibiotiques ont plus un effet sur les compositions des communautés des microorganismes que sur l'intensité des processus. Les processus ciblés étaient principalement ceux du cycle de l'azote, la dénitrification et la nitrification, étudié depuis longtemps en terme de contamination azotée des eaux (Aissa Grouz et al., 2015), d'émission de gaz à effet de serre (N_2O) (Vilain et al., 2014 ; Benoit et al., 2015) et d'eutrophisation côtière. Une nouvelle action a été menée pour travailler sur la multi-contamination dans les sols (collaboration avec l'UMR Ecosys). Le groupe de microbiologie environnementale a également développé, en collaboration avec un laboratoire de l'ENS, une étude pionnière sur le viroplancton non nécessairement pathogène dans la colonne d'eau douce du bassin de la Seine, en utilisant une méthode de détection haut débit d'interférométrie (Roose-Amsaleg et al., 2017). Enfin, les sources de contamination fécale ont été hiérarchisées et quantifiées dans des systèmes subtropicaux où l'assainissement reste un problème de santé publique (Causse et al., 2015 ; Nguyen et al., 2016a ; Nguyen et al., 2016b)

Caractérisation de la matière organique (MO)

La caractérisation de la MO naturelle à l'échelle moléculaire est une des compétences fortes du département et nous sommes largement sollicités pour cela (Derenne et Nguyen Tu, 2016 ; Derenne et Quenea, 2016). Comme décrit en *FM Biogeo 5*, une connaissance fine de la structure de la MO combinée à la mesure de sa composition isotopique fournit des informations clés sur son degré de dégradation. La même approche a été appliquée en archéométrie (*FM UMR 1*) ou pour effectuer des reconstructions paléoenvironnementales (*FM Biogeo 7*). Elle a également permis de révéler la variabilité spatio-temporelle de la MO dissoute et particulaire dans le bassin de la Seine tant en amont qu'à l'aval (*FM UMR 2*). La caractérisation de la fraction la plus hydrophile de la MO constitue toujours un défi analytique et elle nécessite le développement de méthodes spécifiques parmi lesquelles les hydrolyses assistées par micro-ondes, mises au point à METIS (Allard et Derenne, 2013) ou l'utilisation de nouvelles approches comme la Polarisation Nucléaire Dynamique en RMN, en collaboration avec l'Université de Lille (Pourpoint et al., 2017). Par ailleurs, en collaboration avec le MNHN, nous avons synthétisé en laboratoire de la MO qui présente les mêmes caractéristiques moléculaires et isotopiques que celle de la MO insoluble des météorites, ouvrant ainsi une possible voie d'organo-synthèse pour ces matériaux extraterrestres (Biron et al., 2015 ; Robert et al., 2017).

Dynamique de transfert des micropolluants dans les bassins versants

Les travaux du groupe de chimie des micropolluants portent sur la contamination des différents compartiments des écosystèmes (en particulier le compartiment atmosphérique dans lequel il étudie notamment la présence de perturbateurs endocriniens, comme détaillé en *FM Biogeo 8*) et les transferts entre ces environnements. La caractérisation des sources est une étape clé dans la compréhension des transferts de contaminants. Ces sources peuvent être ponctuelles et très localisées comme dans le cas de l'étude de l'impact de la proximité d'une route ou de l'épandage de boues de stations d'épuration, sur les teneurs en HAP ou en antibiotiques dans une parcelle agricole (thèses de D. Gateuille, 2013; T. Q. Dinh, 2012). Au niveau régional, la présence de sites à risques dans le paysage permet également de justifier des « hot spots » de contamination (thèse d'A. Surchamp, 2016). L'étude de cette répartition spatiale n'est cependant pas suffisante et de nouveaux outils ont été développés comme par exemple la caractérisation isotopique des HAPs (thèse de R. Fauches, 2017). Ces approches sont différentes de celles mises en œuvre dans le cas des pollutions diffuses (thèse d'A. Maiga, 2013) et pour lesquels des actions de modélisation ont été menées en collaboration entre les 2 départements de METIS (thèse de W. Queyrel, 2014). Enfin, le recrutement d'une MCF EPHE a permis d'élargir ces travaux en intégrant une nouvelle thématique sur l'écotoxicologie comme détaillé en *FM Biogeo 2* et pour laquelle un financement de thèse vient d'être accordé.

Cycle des éléments biogènes et couplages

Comme mentionné ci-dessus, le cycle du carbone a été abordé à l'échelle moléculaire avec l'étude des mécanismes de préservation de la MO dans les sols (*FM Biogeo 5*). Des études d'adsorption et désorption du phosphore ont contribué à une ré-évaluation des paramètres cinétiques dans un contexte de modification des traitements en stations d'épurations (Aissa-Grouz et al., 2016; Vilmin et al., 2014). Celui de l'azote a été étudié en étroite interaction avec le groupe de microbiologie environnementale (processus anammox, dynamique des nitrites dans la Seine, ..., *FM Biogeo 1*). Il a été particulièrement étudié en termes de cascades de l'azote réactif dans l'environnement, en lien avec les performances agro-environnementales, à des échelles territoriales (Benoit et al., 2014, 2015, 2016; Anglade et al., 2015a, 2015b, 2016), à l'échelle nationale (Lassaletta et al., 2014) et européenne (Leip et al., 2015 ; Sanz Cobena et al., 2015), voire globale (Lassaletta et al., 2014). De ces points de vue, un travail innovant sur les couplages de cycles N, P, C des sols agricoles à l'échelle des territoires français vient de paraître (Le Noë et al., 2017).

Par ailleurs, le couplage des cycles des éléments biogènes N, P, C, silice (Si) et de l'oxygène formalisé dans la modélisation biogéochimique du modèle Riverstrahler a été étudié dans différents projets (Emosem-ERANET, Flam-Liteau, PIREN-Seine) portant sur l'impact des continuums aquatiques sur l'eutrophisation côtière. Les scénarios montrent qu'un changement structurel de l'agriculture est nécessaire pour combattre ces développements massifs d'algues indésirables (Romero et al., 2013 ; Passy et al., 2013 ; Lee et al., 2014 ; Passy et al., 2016).

Outre le sélénium dont le transfert sol-plante a fait l'objet de travaux approfondis (*FM Biogeo 6*), le cycle d'autres éléments trace (ET) a été étudié, notamment en raison de leurs persistances et de leurs effets néfastes voire toxiques sur les organismes. A la demande de collègues biologistes et écologues, les ET ont été analysés dans divers organismes afin d'étudier leur mobilité et leur bio-assimilation, d'identifier les stocks et les sources ou de gérer leur devenir.

Parmi les informations obtenues, on notera : (i) l'identification de mécanismes d'incorporation, via les stomates, de fractions particulières contaminées en métaux par solubilisation (Schreck et al. 2012) ou de formation de phosphates métalliques dans la rhizosphère (Austruy et al., 2014), de phytostabilisation d'arsenic et d'antimoine dans les racines de végétaux ayant recolonisé d'anciens sites miniers (Jana et al. 2012) ou présents dans des sites industriels contaminés (Shahid et al., 2013) ou encore (ii) la connaissance des zones d'habitats restreintes des pigeons grâce aux teneurs en ET dans leurs plumes (Frantz et al., 2012).

Agriculture, qualité de l'eau et empreintes alimentaires

L'approche GRAFS (Generic Representation de l'Agro-Food System) a d'abord été développée pour le cycle de l'azote (Billen et al., 2014) puis celui du phosphore (Garnier et al., 2015). Elle intègre maintenant les éléments N, P, C (Le Noë et al., 2017). Cette problématique très transversale et intégratrice est détaillée dans *FM UMR 3*. Elle s'est nourrie de plusieurs projets, par exemple ABAC (depuis 2012, *FM Biogeo 3*) et a permis de nouveaux couplages de modélisation, notamment pyNuts-Riverstrahler/GRAFS (Thieu et al., 2016 ; projets Emosem-ERANET; PIREN-Seine; EC2CO, L-IPSL), *FM Biogeo 4*). L'analyse des trajectoires passées et les outils de modélisation permettent à notre département d'explorer des scénarios du futur qui, loin d'être prescriptifs, permettent d'analyser les conséquences de certaines trajectoires qui pourraient être suivies sur des territoires si les tendances déjà perceptibles dans les dynamiques actuellement à l'œuvre étaient poussées jusqu'au bout de leur logique (Billen et al., 2015 ; Garnier et al., 2016 ; Lassaletta et al., 2016 ; *FM UMR 3*).

Faits marquants

FM Biogeo 1 - Intégration de la microbiologie environnementale au département

Lors de la création de METIS, l'intégration du pôle de microbiologie dans les thématiques de recherche était un objectif. Il a été atteint comme en témoigne la liste des activités suivantes.

La microbiologie environnementale a pu être couplée avec succès à la géochimie organique pour l'étude du processus anammox en milieu continental (post-doc S. Naeher, projet Emergence UPMC, Partenariat Hubert Curien Germaine de Staël, séjour de professeur invité J. Zopfi, Université de Lausanne; 1 publication en 2015), en milieu estuarien, pour l'étude de la dynamique de la matière organique et des nutriments (projet Seine-Aval Mosaic 2014-17) ou enfin pour l'étude de l'adaptation lipidique des archées du sol à la température (Projet Convergence/Emergence Sorbonne Universités ThermoThaum ; post-doctorante C. Zell, collaboration S. Collin, Institut de Biologie Paris-Seine, UPMC). De même, dans le cadre d'un projet portant sur la dégradabilité de la matière organique, mesurer la diversité métabolique des communautés microbiennes associées aux activités des vers de terre du sol s'est révélé un véritable atout pour la compréhension de ce phénomène (thèse Alix Vidal 2016, projet EC2CO 2015). Par ailleurs l'équipe a été impliquée dans l'étude de la dynamique des nitrites dans la Seine (thèse de T. Cazier 2016 ; post-doctorat de M. Raimonet). Le pôle Microbiologie a développé une approche originale de l'étude des effets des antibiotiques sur les communautés microbiennes fonctionnelles des sols. Ce travail a été possible en utilisant les compétences de l'équipe Micropolluants de l'UMR METIS et a été valorisé (Roose-Amsaleg et Laverman, 2016). Ceci a valu à l'UMR METIS d'être intégrée au consortium en charge de la rédaction d'une revue systématique sur l'antibiorésistance (Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité, Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer).

FM Biogeo 2 - Apport de nouvelle(s) thématique(s) à l'UMR (écotox)

Le recrutement d'A. Goutte en octobre 2014, en tant que MCF à l'EPHE, a permis de lancer une nouvelle dynamique au sein du département en intégrant l'écotoxicologie à l'étude des transferts de contaminants dans les milieux aquatiques. Ses travaux de recherche portent sur les processus qui gouvernent l'imprégnation des poissons par les polluants organiques (phtalates, hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP, pesticides pyréthrinoides) en milieu naturel, à savoir les voies d'exposition, ainsi que les modalités d'accumulation, de biotransformation et de détoxification des organismes. La prise en compte des métabolites de ces micropolluants permet de préciser le rôle des organismes aquatiques dans le cycle des contaminants. De plus, les transferts de polluants des proies aux prédateurs ont été caractérisés dans un écosystème lotique soumis à une forte pollution, en utilisant le fractionnement isotopique de l'azote comme signature du niveau trophique. Enfin, ses travaux visent à intégrer les effets de l'imprégnation des organismes par les polluants organiques, à différentes échelles biologiques. Sur les oiseaux marins polaires et les poissons d'eaux douces en France métropolitaine, elle étudie les perturbations endocriniennes, l'induction de stress oxydant, les troubles comportementaux, la dégradation de l'état sanitaire, les conséquences sur la reproduction et le taux de survie, ainsi que sur la dynamique des populations (Fourgous et al., 2016 ; Goutte et al., 2015a ; Goutte et al. 2015b, Constantini et al., 2015). Ses trois projets de recherche actuels sont soutenus logistiquement et financièrement par le PIREN-Seine, l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN) et le Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (SIAAP).

FM Biogeo 3 - Mise en place du réseau d'exploitations agricoles ABAC (science participative)

Afin de comprendre comment réduire la contamination azotée, un réseau d'exploitations agricoles a été instrumenté dès 2011, dans un gradient de pratiques et pour les deux systèmes (agriculture conventionnelle et biologique, 19 itinéraires techniques, 80 parcelles). Les agriculteurs sont acteurs en participant aux prélèvements, à des entretiens annuels, à des restitutions de résultats sur site et aux comités de pilotage (annuels, 5 au total intégrant de nombreux

acteurs et les agriculteurs). Ce projet a bénéficié d'un financement de la Région Ile-de-France via un équipement lourd et une bourse de thèse (Marie Benoit, 2015; Benoit et al., 2014; 2015; 2016) et de co-financements de l'Agence de l'Eau et Eau de Paris. ABAC a conduit à de nombreuses sollicitations de la part d'acteurs de l'eau, de l'INRA ou à des requêtes individuelles lors de manifestations de Fédérations d'agriculteurs. Les résultats du réseau ABAC permettent de renseigner les fuites d'azote par l'agriculture (sous forme de lixiviation et d'émission de N₂O) mais aussi d'évaluer les performances agronomiques en termes de N, P, C. Ce projet, pour un total d'environ 750 000 € pour 4 ans, a permis de financer, outre le travail de la thèse, deux techniciens CDD et d'acquérir de nouveaux appareils (GC, véhicule, stations météo, préleveurs...). Les résultats obtenus sur des fermes expérimentales, à la différence de ceux de l'INRA essentiellement issus d'essais, ont conduit à caractériser de manière novatrice, des systèmes contrastés, en agriculture biologique vs. conventionnelle, aux pratiques variées et servent de base pour tester les scénarios (cf *FM Biogeo 4*) d'une agriculture du futur qui permettrait de garantir une bonne qualité des eaux (Garnier et al., 2014, 2016). Grâce à ces travaux, nous sommes partenaires du projet international INMS (GEF, INI, UNEP, ...).

FM Biogeo 4 - Développement de la plateforme de modélisation pyNuts-Riverstrahler | GRAFS

L'approche GRAFS basée sur un bilan détaillé des flux impliqués dans la production, la transformation et la consommation de produits animaux et végétaux dans un territoire permet de quantifier un surplus en azote, indicateur des fuites d'azote vers l'environnement. L'approche GRAFS est actuellement élargie au phosphore et carbone (thèse de J. Le Noë). GRAFS peut être décliné à des échelles multiples (de la parcelle, à l'exploitation -thèses de M. Benoit et J. Anglade- au continent, ou même à l'échelle globale -Post-Doc de L. Lassaletta-) et constitue une condition limite au modèle Riverstrahler.

Riverstrahler, redéployé sous une plateforme PyNUTS, grâce à la FR-FIRE, permet désormais de modéliser le continuum aquatique, du petit bassin à une échelle continentale ou globale (Façade Atlantique Nord à ce stade, projet ERANET SeaEra, Emosem). La plateforme PyNuts permet de calculer toutes les entrées requises par le modèle Riverstrahler pour chaque unité de modélisation (des sous-bassins) à partir d'une base de données hétérogènes rassemblée sur tout le domaine d'étude, et de les stocker sous une forme homogène nécessaire au pilotage de tout projet de modélisation. Les bases de données d'entrée ou de sortie du modèle PyNuts-Riverstrahler sont organisées en bases relationnelles facilitant le stockage et le post-processing.

Outre les scénarios agricoles que l'on peut explorer avec GRAFS pour alimenter PyNuts-Riverstrahler, un modèle hydrologique permettant de tester l'influence du changement climatique a aussi été développé (Projet L-IPSL, post-doc de M. Raimonet pour constituer une condition limite à Riverstrahler via la plateforme PyNuts). Un nouveau stage post-doctoral va permettre de coupler un modèle estuarien à cette échelle de la Façade Atlantique et ainsi enrichir la plateforme PyNuts.

FM Biogeo 5 - Devenir de la matière organique

Les mécanismes de dégradation/préservation de la matière organique dans l'environnement ont été au cœur de plusieurs études au sein du laboratoire Métis.

La caractérisation moléculaire de la matière organique et son suivi par analyse isotopique sont deux approches privilégiées dans le département « biogéochimie ». L'approche développée repose souvent sur un suivi d'incubations au laboratoire (en microcosmes ou mésocosmes) ou sur le terrain (sacs de litière). Deux thèses (A. Vidal, R. Tramoy) ont eu pour objet ce suivi de la MO et ont conduit à mieux comprendre les mécanismes de transformation de la MO végétale dans les environnements continentaux.

Ces études sont basées pour la plupart sur la caractérisation isotopique (¹³C, ¹⁵N) de la MO à l'échelle de la MO totale ou à l'échelle moléculaire. Ainsi l'intégration de MO microbienne a été mise en évidence lors de la dégradation de bois en milieu aquatique (Tramoy et al. 2017). Le marquage de végétaux au ¹³C (Nguyen Tu et al., 2013) et leur suivi en mésocosme a permis de confirmer une dégradation différentielle des parties aériennes et racinaires des végétaux (Vidal et al., 2017). De plus, leur observation par microscopie électronique en transmission et NanoSIMS a souligné le rôle des vers de terre dans cette dégradation notamment via la stimulation de l'activité microbienne dans les turricules (Vidal et al, 2016a).

Par ailleurs, l'analyse de la composition moléculaire de la MO au cours des incubations a révélé la dégradation différentielle de diverses familles de molécules (Nguyen Tu et al., 2017) et notamment l'augmentation croissante du degré d'oxydation de la lignine (Vidal et al., 2016b). La combinaison d'analyses moléculaires et isotopiques a en outre mis en évidence la disparité des temps de résidence au sein même des lipides (Mendez-Millan et al., 2014).

FM Biogeo 6 - Transferts sol-plante d'éléments trace (ET)

Le sélénium (Se) est un élément trace ubiquiste dans l'environnement, essentiel au métabolisme animal à des doses optimales mais toxique à des concentrations à peine dix fois supérieures. Se est apporté via l'alimentation, et les végétaux représentent un maillon essentiel comme voie d'entrée de Se dans le réseau trophique. Les sols européens, généralement pauvres en Se, ne permettent pas d'obtenir des quantités optimales de Se dans les plantes agrootimentaires.

L'assimilation et la spéciation de Se ont été étudiées à partir de deux plantes agroalimentaires généralement non accumulatrices en Se (< 100 mg/kg) puis le devenir des composés sélénisés a été suivi pendant 10 mois lors de la dégradation en prairie par une technique innovante de marquage isotopique de litières en ^{78}Se , ^{82}Se , ^{13}C et ^{15}N .

Les résultats montrent que le taux d'assimilation et le degré de métabolisation de Se chez *Zea mays* L. (Longchamp et al., 2013) et *Lolium perenne* L. (Versini et al., 2016) dépendent des concentrations et formes du Se apporté (sélénite ou séléniate principalement). Dans ces conditions contrôlées, ces végétaux accumulent finalement plusieurs centaines de mg/kg, ce qui n'est pas sans risque sur l'assimilation d'autres cations essentiels (caractère pro-oxydant de Se) (Longchamp et al., 2015). Par ailleurs, le marquage isotopique nous a permis de préciser les voies métaboliques de Se dans une plante non accumulatrice (*Lolium perenne* L.) et surtout de mettre en évidence que plus de 50% des composés organo-sélénisés ne sont pas encore identifiés (di Tullo et al., 2015); leur devenir dans les sols est donc ignoré. En conclusion de ces études, nous avons mis en évidence chez ces plantes des voies métaboliques de Se similaires à celles développées par les plantes accumulatrices, permettant ainsi de s'affranchir de la toxicité de Se.

FM Biogeo 7 - Développement de nouveaux outils de reconstruction paléoenvironnementale

Le laboratoire METIS a, ces dernières années, su utiliser son expertise en géochimie organique moléculaire et isotopique pour la reconstruction de paléoenvironnements terrestres et aquatiques. Les microorganismes sont capables d'ajuster la composition lipidique de leurs membranes de manière à leur assurer la fluidité appropriée au milieu dans lequel ils vivent. Ces capacités d'adaptation sont utilisées pour développer, à partir des lipides microbiens, des marqueurs des conditions environnementales. Ainsi, les alkyl tetraéthers de glycérol, lipides présents dans la membrane des archées et de certaines bactéries, sont des outils appliqués depuis plusieurs années aux reconstructions paléoclimatiques en milieu terrestre et aquatique, et faisant l'objet d'un intérêt grandissant. Le Département Biogéochimie de l'UMR METIS a développé une réelle expertise nationale et internationale sur ces molécules et a mis en place une approche intégrative et interdisciplinaire, en cherchant à mieux contraindre leur origine (i.e. leurs microorganismes sources), leur devenir, et leur applicabilité en tant que marqueurs de (paléo) température et de (paléo)pH dans les milieux naturels. La thèse de S. Coffinet a permis de valider l'utilisation de lipides d'origine microbienne (alkyl tetraéthers de glycérol) pour la reconstruction des changements environnementaux en Afrique de l'Est via l'étude d'archives sédimentaires et tourbeuses (projet EC2CO CNRS/INSU; Coffinet et al., 2014, 2015, 2016). L'acquisition de connaissances sur les tetraéthers et l'application de ces composés organiques en tant que marqueurs de (paléo)environnement dans des milieux (sols, tourbe, sédiments terrestres, lacustres, marines côtiers, racines calcifiées) et à des époques géologiques (Holocène ; Pléistocène ; Eocène-Oligocène) variées a conduit à de nombreuses collaborations nationales (ANR PEATWARM; thèse E. Stetten, ISTEP (UPMC); thèse de J. Ghirardi, ISTO (Orléans); thèse de S. Mignard, EPOC (Bordeaux) et internationales (Université de Bayreuth, MARUM - Brême, Université de Zürich, Université de Nairobi, Université d'Aberdeen), concrétisées par de nombreuses publications (Galka et al., 2015 ; Gocke et al., 2017 ; Gogo et al., 2016 ; Huguet et al., 2012, 2013a, b, 2014, 2015, 2017). Nous avons par ailleurs montré l'intérêt de l'utilisation des isotopes stables (^{13}C , ^{15}N , ^2H) pour les reconstructions paléoenvironnementales, en complément des biomarqueurs moléculaires (thèse de R. Tramoy, Tramoy et al., 2016) via l'étude d'une coupe sédimentaire Jurassique, prélevée en Asie Centrale.

FM Biogeo 8 - Les perturbateurs endocriniens, de nouveaux contaminants atmosphériques

Les travaux concernant la contamination de l'atmosphère par les micropolluants organiques (polychlorobiphényles, pesticides et hydrocarbures aromatiques polycycliques) ont été poursuivis et également étendus à de nouveaux contaminants, notamment des perturbateurs endocriniens (PE). Ainsi le laboratoire METIS est l'une des deux équipes françaises à étudier dans l'air la présence de PE, tels que les phtalates, les retardateurs de flamme, le BPA, les alkylphénols, les parabènes ou les muscs synthétiques. De plus, l'exploration de la contamination de l'air par ces PE a été réalisée aussi bien dans l'air intérieur que dans l'air extérieur, tout d'abord en région Ile-de-France et par la suite en région Hauts-de-France en collaboration avec ATMO Hauts-de-France. Au cours de ces travaux, l'identification des sources a été un axe de recherche important. Ainsi, les études se sont focalisées sur différents types de bâtiment (crèche, école, appartement, maison, bureau) et sur les activités potentiellement émettrices telles que le trafic routier ou ferroviaire, le retraitement des déchets et les activités industrielles en relation avec la densité urbaine. En complément à cette caractérisation chimique, un volet biologique a été ajouté en collaboration avec une équipe d'écotoxicologues, afin d'estimer le risque de générer des perturbations endocriniennes. De plus, la contamination atmosphérique en milieu urbain a été étudiée sous un aspect historique. Dès le début du XIX^e siècle, une prise de conscience de la pollution de l'air liée aux activités industrielles existe. Celle-ci a abouti aux premières mesures de régulation jusqu'à la surveillance actuelle de la qualité de l'air (Lestel, 2013). La réalisation de ces différents projets a été co-financée pour un montant de 500K€ par divers programmes (Piren-Seine, PNRPE, ADEME, CORTEA) et différents organismes (CSTB, Atmo-Picardie, Atmo-Hauts-de-France). Leur réalisation a également conduit à la soutenance de deux doctorats (S. Laborie, 2015 ; A. Surchamps, 2016). Enfin, ces recherches ont été valorisées par de nombreuses publications (Alliot et al., 2014 ; Blanchard et al., 2013 ; Laborie et al., 2016 ; Moreau et Chevreuil, 2014 ; Moreau-Guigon et al., 2016 ; Oziol et al., 2017 ; Teil et al., 2016 ; Desportes et al., sous presse) et 2 ouvrages de diffusion vers le grand public.

3. Analyse SWOT

Forces

- Très forte reconnaissance dans plusieurs domaines (nutriments & agronomie, écologie territoriale, caractérisation moléculaire de la matière organique)
- Fort réseau européen dans le domaine nutriments, agronomie, écologie territoriale
- Fort potentiel analytique
- Fort potentiel dans les interactions de nos compétences en matière organique, nutriments, contaminants, notamment autour de projets incluant la microbiologie environnementale

Faiblesses

- Erosion du personnel CNRS
- Collaborations entre groupes à améliorer
- Manque de chercheur spécialiste de l'analyse des contaminants organiques malgré l'importante plate-forme analytique

Opportunités

- S'appuyer sur les politiques régionales concourant à la transition environnementale (agro-hydro-écologie)
- Recruter un enseignant-chercheur dans le domaine de la chimie environnementale à l'EPHE
- OSU Ecce Terra et ses plateformes, ouverture vers de nouvelles collaborations internes et externes (M2C ?)
- Participation aux fédérations de Recherche FIRE et IPSL.
- Création du département Biogéochimie encore récente, potentiel de collaborations internes encore en développement

Menaces

- Parc analytique vieillissant en géochimie organique et analyse de contaminants organiques
- Personnel technique insuffisant pour faire fonctionner le potentiel analytique
- Affaiblissement numérique de nos capacités en microbiologie environnementale
- Départs de cadres A en cours (géochimie organique) et fin de mandat (biogéochimie des nutriments)
- Réduction de la visibilité au sein de l'INC (seulement 1 CR en fin de contrat)

4. Projet scientifique à cinq ans

Le projet du département Biogéochimie s'articule autour de trois grands axes thématiques au sein desquels sont déclinées les compétences disciplinaires des membres du département. Compte tenu de l'évolution des moyens humains au cours du prochain quinquennal, notamment avec le départ de cadres A, ce projet ne pourra toutefois être mené à bien qu'en renforçant certains champs thématiques comme la modélisation biogéochimique et la géochimie organique moléculaire. En effet, la démarche de modélisation biogéochimique du continuum terre-mer en lien avec l'activité humaine sur les bassins reste une spécificité de METIS, mais nécessite des développements de modules aux interfaces (eau-sol, estuaires, ...) et des couplages de modèles nourris par des mesures/expériences de terrain, autant d'activités qui impliquent de renforcer l'équipe désormais constituée de deux chercheurs (1 MDC, 1 DR1). Par ailleurs, la MO constitue un compartiment clé dans le fonctionnement des écosystèmes et sa caractérisation au niveau moléculaire est une spécificité du département. Des verrous analytiques sont encore à lever notamment pour l'analyse des fractions hydrophiles. Des développements initiés ces dernières années sont interrompus depuis le départ d'une IR dont le remplacement est donc indispensable. Il faut noter qu'à la fin du quinquennal prochain, il n'y aura plus qu'un chimiste de formation (CR1) en raison du départ en retraite en cours de mandat du DR. En revanche, nous bénéficierons de l'arrivée d'un Pr géochimiste, spécialiste des interactions eau-roche, faisant ainsi le lien entre les deux départements de METIS.

Le continuum Sol-Eau/Terre-Mer : de l'expérimentation à la modélisation

Le fonctionnement des Surfaces et Interfaces Continentales (qui constituent aussi la Zone Critique de la planète) est aujourd'hui largement conditionné par les interactions de l'activité humaine avec les autres composantes de l'environnement.

Le continuum Sol-Eau/Terre-Mer est appréhendé comme un métabolisme, au sens de l'écologie territoriale, étudiant les flux de matières comme indicateur du fonctionnement biogéochimique des territoires. L'objectif est de parvenir à une vision d'ensemble de grands territoires, au travers d'une représentation opérationnelle et quantitative (modélisation) en lien avec les gradients climatique et anthropique. Cela implique d'une part de raffiner l'étude de certains processus (fins) dont les mécanismes restent à décrire/documenter avant de pouvoir être intégrés à plus grande échelle, celle des bassins versants, et d'autre part de poursuivre l'amélioration de nos modèles. L'hydrosystème propose une dimension d'étude longitudinale (amont-aval) évidente pour des surfaces continentales, s'étirant de têtes de bassin jusqu'à l'exutoire des systèmes fluviaux, en zone côtière, incluant les zones d'interface estuarienne. Ce continuum Terre-Mer devra également représenter la connectivité hydrologique et les interactions

avec les parties terrestres (Sol-Eau) afin d'intégrer les échanges de matière entre le cours d'eau et ses parties riveraines. Enfin, ces travaux incluront le temps long afin de retracer des trajectoires fonctionnelles et explorer divers scénarios prospectifs d'évolution (cf projet transversal « trajectoires » de l'UMR).

Etude de processus

Le réseau d'exploitations agricoles ABAC (Région IdF, AESN-EdP) a permis de quantifier les pertes d'azote par lixiviation en grandes cultures conventionnelles et biologiques, mais va aussi permettre l'analyse du stockage de la matière organique (MO) et de phosphore, ou leur déstockage. La MO qu'il faudrait stocker à 4 pour 1000/an pour contrebalancer les émissions de CO₂ de l'activité humaine et réduire le dérèglement climatique, peut en effet être exportée vers les cours d'eau dont l'intensité du dégazage est en cours d'étude dans l'ITN C-Cascade (thèse en cours). Cette interaction sol-eau, en caractérisant la matière organique dissoute jusqu'à un niveau moléculaire, sera un aspect important de la prochaine phase de METIS (projets du PIREN-Seine, et soumission EC2CO puis ANR). Ces émissions de gaz à effet de serre (GES) issues de processus biologiques (CO₂, CH₄ et N₂O) qui transitent par les zones souterraines, ripariennes et eaux de surface constituent les émissions indirectes, et sont trop peu documentées selon l'IPCC 2014. Le projet HydroGES, ADEME va permettre de les étudier spécifiquement.

Une caractérisation globale et moléculaire de la MO particulaire et dissoute sera menée en amont de la Seine et les résultats seront comparés à ceux précédemment obtenus tout au long de l'estuaire de Seine (projet GIP Seine-Aval MOSAIC, 2014-2017), ceci afin de déterminer les sources et le devenir de la MO le long de l'axe Seine et d'étudier l'impact des variations qualitatives et quantitatives de la MO en termes de qualité de l'eau.

Les contaminants organiques et éléments traces (ET) se comportent différemment des nutriments dans un bassin versant car les phénomènes de rétention conditionnent les stocks au sein des compartiments physiques. Ces processus peuvent être appréhendés d'une façon globale en étudiant la contamination sur le long terme dans le système sol-nappe-rivière. C'est le cas notamment pour les pesticides interdits pour lesquels un suivi de la contamination dans les eaux de surface et souterraines a été mis en place (projet CARPE, R2DS, Piren Seine, cf projet transversal chantiers partagés).

Le comportement des Terres Rares, Zr et Hf sera étudié dans les phases dissoute et colloïdale d'eaux de surface et souterraines dans plusieurs environnements naturels ayant différentes valeurs de salinité, pH, potentiel redox et fugacité, ainsi que des teneurs en ligands inorganiques et organiques variables. Nous étudierons aussi la dissolution de séries évaporitiques, notamment pour élaborer de nouvelles stratégies d'exploration et production car ces circulations sont généralement associées à des conditions spécifiques d'enfouissement et à des modifications diagénétiques particulières (Contrat IFP-EN). En l'absence de forages profonds, l'étude débutera par l'analyse de la composition chimique (éléments majeurs, mineurs et traces) des eaux de surface et des eaux profondes du bassin sédimentaire.

La MO joue un rôle clé dans la complexation des ET et les micropolluants organiques. Les éléments Br, Se et Ra seront en particulier étudiés afin d'identifier les stocks d'ET associés à la MO, de quantifier et caractériser la distribution de ces ET entre les fractions chimiques labiles et réfractaires issues de la dégradation de cette MO (Projet Needs). Par ailleurs, l'augmentation récente des températures en région arctique induit le dégel progressif du pergélisol favorisant ainsi la mobilisation d'éléments accumulés dans ces sols généralement riches en MO. La dynamique des ET dans les sols arctiques sera étudiée en lien avec l'évolution de cette MO dissoute (EC2CO 2017). Les interactions initiées au sein du département Biogéochimie ont également fédéré des projets tels que l'étude des relations MO-Micropolluants (hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), phtalates, pesticides) (initiée en 2016 dans le bassin versant de l'Orge en spécifiant les formes de la MO qui interagissent).

Modélisation biogéochimique et changement d'échelle

La plateforme de modélisation pyNuts propose un assemblage d'échelles inédit, qui s'initie (au travers du modèle Riverstrahler) à l'échelle des processus microscopiques (transformation et transfert de matière des communautés biologiques), puis celle des réseaux hydrographiques dans un gradient amont-aval, et s'exporte à un niveau encore supérieur : l'échelle plurirégionale des zones côtières (actuellement l'ensemble des bassins de la façade Atlantique Nord-Est). Cette plateforme de modélisation modulaire servira de cadre pour accueillir de nouveaux développements directement reliés à l'étude fine des processus biogéochimique dans l'eau et les sols, mais aussi à l'interface sol-eau (cf projet transversal « intégration des modèles » de l'UMR).

Pour les GES (cf. ci-dessus) il s'agira de poursuivre la formalisation mathématique des émissions des trois principaux GES dans notre approche de modélisation biogéochimique alors que les observations de terrains serviront selon leurs types, de conditions limites au modèle du continuum terre-mer.

Les travaux en cours sur les impacts indirects du changement climatique (modification des régimes hydrologiques et des températures de l'eau) sur les transferts de nutriments le long du continuum Terre-Mer seront complétés par l'analyse des émissions de GES en considérant l'impact croisé du changement climatique et des impacts anthropiques (en prolongement du projet MARICCA EC2CO-LEFE et L-IPSL, 2015-2017). L'extension de la modélisation fluviale (Riverstrahler : carbone et nutriments) aux parties estuariennes (modèle GEM) sera réalisée dans le cadre d'un projet L-IPSL (2017-2019) en collaboration avec les concepteurs (Univ. Bruxelles) et la FR-FIRE pour assurer la continuité des exercices de simulations Terre-Mer jusqu'aux zones côtières. En complément, les travaux du projet interdisciplinaire

Seine-Aval "PHARE-SEE" (2017-2020, impliquant 11 laboratoires) traiteront spécifiquement de la productivité microphytobentique des habitats intertidaux en lien avec la dynamique sédimentaire et biogéochimique et combineront approche de terrain et modélisation afin de comparer le fonctionnement estuarien de vasières de la Seine avec d'autres écosystèmes estuariens.

Enfin, le partenariat de l'UMR METIS avec MINES ParisTech est maintenu par la collaboration avec le centre de géosciences pour la modélisation du transfert des pesticides sur le long terme (modèle PeStics couplé à MODCOU et le transfert du nitrate des eaux souterraines vers les eaux de surface avec le couplage entre MODCOU et Riverstrahler (PIREN Seine, AESN).

Analyse prospective et rétrospective des systèmes hydro-agro-alimentaires territoriaux.

A l'échelle régionale, le système hydro-agro-alimentaire du territoire estuarien de la Seine et la trajectoire socio-écologique a été étudié sur un siècle (projet RESET, GIP-Seine-Aval, 2015-2017). Outre la valorisation de ce projet transdisciplinaire, porté par METIS, cette approche sera étendue aux grands estuaires de la façade atlantique (Seine, Loire, Gironde en particulier) pour comprendre comment les grands ports structurent le fonctionnement des systèmes territoriaux de leur hinterland (les bassins amont), mais aussi déterminent la qualité de l'eau et les phénomènes d'eutrophisation, et d'hypoxie associés (projet soumis à l'AFB). Au-delà, le projet international INMS (GEF, INI, UNEP), a pour objectif d'analyser ces systèmes hydro-agro-alimentaires pour des territoires contrastés, en régions Tempérées vs Méditerranéennes, à des échelles emboîtées (de petits sous-bassins aux bassins versant dans leur ensemble (par exemple: Orgeval < Grand Morin < Seine vs. Henares; Henares<Tage; collaboration Université de Madrid). L'établissement des trajectoires du système agroalimentaire impliquent la reconstruction de chroniques de longue durée et l'analyse de l'héritage séculaire des pratiques agricoles (cf. Stocks de matière organique et de phosphore, thèse en cours). Des scénarios prospectifs, mais pas nécessairement prescriptifs seront analysés en termes d'impacts anthropiques, mais aussi de changements climatiques (§ ci-dessus et projet transversal « trajectoires »).

Rôle du biote sur le devenir des contaminants et de la MO dans les écosystèmes

Les organismes vivants jouent un rôle majeur dans les cycles biogéochimiques et celui des contaminants. D'une part, ils participent à l'assimilation, la dégradation, la métabolisation et la bioaccumulation des éléments et d'autre part, ils influent directement sur le devenir de la MO dans les écosystèmes. Ces processus et les organismes qui en sont responsables évoluent en fonction du degré de contamination du milieu et des paramètres environnementaux.

Interactions Biote-Polluants

L'étude de la multi-contamination chronique des milieux aquatiques présente un défi environnemental et sanitaire majeur. En Europe, l'émission chronique de micropolluants tels que les plastifiants (phtalates), les HAP, les polybromodiphényléthers et les pesticides menacent le bon état écologique d'environ la moitié des cours d'eau. Les processus qui gouvernent l'imprégnation des organismes en micropolluants restent complexes à appréhender en milieu naturel, en raison des différentes sources d'exposition et des modalités de bioaccumulation et de détoxification des organismes. Une première étude visera à comprendre la contribution du niveau trophique, mesurée à partir de la signature isotopique des individus, sur les teneurs en micropolluants des poissons d'eau douce du réseau MeSeine, en collaboration avec le SIAAP. De plus, les transferts de contaminants de l'hôte vers les parasites sont souvent négligés dans les études écotoxicologiques. Or, les parasites pourraient contribuer à la détoxification de l'hôte. Ce processus ouvre des perspectives originales sur d'éventuels bénéfices du parasitisme en milieux pollués. Concernant les mécanismes proximaux sous-jacents, nous nous focaliserons sur les marqueurs de stress oxydant en collaboration avec iEES Paris (demandes de financement en cours).

Les conséquences de la contamination de l'environnement sur l'homme sont étudiées vis-à-vis de deux groupes de polluants : les perturbateurs endocriniens (PE) et les antibiotiques. Dans la continuité des travaux précédents, la répartition des PE sur les différentes fractions atmosphériques sera étudiée en collaboration avec l'UMR ESE qui en caractérisera le potentiel en PE. Le second axe de ces travaux s'intéressera à la relation entre la présence d'antibiotiques et l'antibiorésistance en collaboration avec des microbiologistes de l'Université de Rouen et de Limoges (financement ANSES).

Impact du biote sur le fonctionnement des cycles biogéochimiques (C, N)

Les organismes vivants jouent un rôle clef dans le fonctionnement des cycles biogéochimiques. L'accent sera mis sur l'action des micro-organismes (bactéries, champignons, archées) et de la macrofaune (vers de terre). Deux axes seront développés, l'un sur l'influence de ces organismes sur le devenir de la MO dans l'environnement (biodégradation, stabilisation, ...) et l'autre sur l'impact du changement global des conditions environnementales sur les archées, notamment les archées oxydatrices de l'ammonium (AOA), impliquées dans le cycle de l'azote. Ces travaux seront menés à différentes échelles (sensibilité/persistance des populations dans les sols, nitrification thermophile, physiologie et métabolisme) par des approches au laboratoire comme sur le terrain en étroite collaboration entre les microbiologistes et les autres membres du département.

Le suivi du devenir de la MO en présence de vers de terre ou de champignons sera réalisé au moyen d'incubations de biomasse végétale préalablement marquée au ¹³C. Il permettra notamment de déterminer (i) si la présence de vers de

terre tend à accentuer la dégradation de la MO ou si, au contraire, cette dernière est stabilisée dans les structures organo-minérales produites par les vers de terre, (ii) si ces mécanismes varient en fonction de l'échelle de temps considéré, grâce à un suivi à long terme des structures formées, (iii) le rôle de la nature des minéraux sur la stabilité de ces structures et (iv) la dynamique des microorganismes impliqués dans la dégradation de la MO. Dans un second projet, grâce à un marquage différentiel entre métabolites labiles (e.g. sucres) et constituants structuraux des végétaux incubés (lignine, cellulose), la nature (labiles vs. structuraux) des constituants organiques utilisés par les champignons pourra être précisée, ainsi que celle des composés fongiques qui en dérivent. Cette étude permettra aussi de déterminer à quel stade de développement des champignons (végétatif vs reproducteur, maximum d'activité de quel enzyme ?) ces composés sont synthétisés. Ces projets multidisciplinaires associeront notamment des approches de microbiologie, géochimie organique moléculaire et isotopique avec des observations en microscopie. Ils feront l'objet de demandes de financement EC2CO en 2017.

L'impact du changement climatique sur les archées sera étudié au travers des mécanismes d'adaptation de leurs parois à des élévations de température. Pour cela, leurs lipides membranaires seront analysés à partir d'isolement et de cultures d'organismes modèles au laboratoire mais également au niveau écosystémique. En parallèle, les protéines de surface (couche S) des archées extrémophiles seront étudiées en collaboration avec A. Kish (MNHN). Par ailleurs, des souches capables d'effectuer la première étape de la nitrification en conditions thermophiles (AOA) seront isolées pour mieux comprendre le rôle des AOA dans le processus de dégradation de la MO dans un compost végétal (collaboration avec l'Université de Brême, PHC PROCOPE et projet PICS déposés, projet EC2CO à déposer). Par ailleurs, la diversité des archées présentes dans les environnements pollués sera explorée, pour identifier la dynamique des AOA et des mécanismes de résistance aux stress, en particulier via des approches de cultures d'enrichissement et de génomique (collaborations METIS et UMR Ecosys, INRA, financement à demander).

Reconstitutions des pratiques et environnements anciens

Pour mieux comprendre des processus environnementaux actuels, les projets de recherche du département Biogéochimie de METIS incluent également un volet visant à reconstituer ces processus et leurs variations dans le passé. Ces projets passent par la reconstitution de variations paléoenvironnementales, paléoclimatiques et de l'influence de l'homme sur son milieu. Ils s'appuient sur la caractérisation isotopique et moléculaire de MO ancienne, ainsi que sur la mise au point de nouveaux outils/marqueurs, et la constitution de référentiels actuels de signature géochimiques.

Ces dernières années, le laboratoire METIS s'est intéressé aux tétraéthers, seuls marqueurs organiques microbiens disponibles pour les reconstructions paléoclimatiques en milieu continental. Nous proposons pour le contrat à venir d'évaluer l'applicabilité de lipides membranaires produits par les bactéries gram-négatives - les acides gras 3-hydroxylés (AGH)- comme nouveaux marqueurs de température et de pH dans les milieux continentaux. Ces marqueurs seront calibrés via une double approche combinant échantillonnage sur le terrain et expériences en laboratoire, en collaboration avec l'équipe de microbiologie de METIS. Les AGH seront ensuite utilisés conjointement avec les tétraéthers pour la reconstruction des changements environnementaux via l'étude de carottes sédimentaires provenant de différents milieux (lac, tourbe, microcosme). Ce travail fera l'objet de la thèse de P. Véquaud qui débutera en octobre 2017 et du contrat ATER de M. Seder Colomina (à partir de septembre 2017).

Une meilleure compréhension de l'influence de l'homme sur son milieu passe également par la reconstitution des activités humaines passées dans leur contexte paléoclimatique. Ainsi, plusieurs projets du département sont basés sur l'étude biogéochimique de restes archéologiques, en comparaison avec des équivalents actuels issus de contextes bien documentés :

- Mise au point d'un référentiel de signatures biogéochimiques (biomarqueurs lipidiques, isotopes stables, éléments majeurs) de l'occupation des sols au Moyen Age (PEPS INEE Löväng) ;
- Développement d'outils dendrologiques et isotopiques de reconstitution des paléoclimats et des pratiques de taille des arbres à partir de l'étude des charbons archéologiques
- Prise en compte de l'effet de la dégradation à long terme dans la préservation des signatures organiques des foyers ;
- Croisement des outils de géophysique (susceptibilité magnétique, collaboration département HGP METIS) et de chimie organique (caractérisation moléculaire, quantification des HAP) pour caractériser les traces d'activités passées (en particulier les foyers).

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de mission contractuelle

sans objet

Annexe 2 : Équipements, plateformes

1. Pôle de Géochimie organique

Le Pôle Analytique de Géochimie Organique (PAGO) est rattaché au département Biogéochimie de l'UMR. Il fait partie de la Plateforme Analytique de Géochimie Organique de l'OSU Ecce Terra. Son but est de caractériser et quantifier des composés organiques dans des matrices environnementales telles que : sols, sédiments, eaux naturelles, roches, météorites, végétaux,... Il est géré par un IE.

Il s'appuie sur plusieurs appareils, se distinguant par (1) les méthodes spectroscopiques qui fournissent des informations sur la nature des fonctions chimiques présentes dans l'échantillon : spectroscopie infra-rouge à transformée de Fourier, spectroscopie UV-Visible et (2) les couplages chromatographiques. Le pôle dispose de 4 chromatographes en phase gazeuse (GC) avec un détecteur à ionisation de flamme ou couplé à un spectromètre de masse (MS), d'un couplage pyrolyseur à point de Curie-GC-MS et d'un chromatographe en phase liquide couplé à un spectromètre de masse (LC-MS).

Les dernières acquisitions sont donc un couplage LC-MS (2013, crédits OSU) et un passeur automatique pour équiper un GC (2016, crédits INSU).

Ces appareils sont accessibles aux membres des laboratoires constituant la plate-forme GEORG du pôle 3 de l'UPMC et aux chercheurs extérieurs par voie de collaboration moyennant une participation aux coûts analytiques. En dehors des chercheurs de METIS, le pôle a été utilisé par des chercheurs de l'UPMC et de la COMUE¹ et de chercheurs venant d'autres structures, dans le cadre de multiples projets qui se situent dans le domaine d'intérêt de l'unité (matière organique prébiotique, paléo-environnements, marqueurs lipidiques bactériens et archéens, sédimentation sur les marges continentales, étude de sols).

Les 2 GC-MS ont été achetés en 2004 et 2006. La disponibilité des pièces pour la maintenance n'est garantie que pour 10 ans par les constructeurs. Ces appareils sont utilisés de manière intensive, notamment dans le cadre de nombreux projets et contrats, et leur arrêt poserait immédiatement un problème majeur.

Une demande a été faite auprès de l'OSU afin d'anticiper une panne totale de ces 2 appareils en remplaçant un au plus vite à l'identique. Nous souhaitons ensuite remplacer le 2ème appareil par un système plus performant.

Notre choix se porte actuellement vers un couplage GC-avec un spectromètre de masse en tandem quadripole- temps de vol (Q-TOF) qui permet d'obtenir les masses exactes des composés, d'où une identification plus fiable notamment pour les composés comportant des hétéro-éléments. La caractérisation de l'azote organique dans les environnements naturels constitue encore actuellement un défi analytique dans lequel notre unité est impliquée. Ce type de couplage constituerait une évolution sensible de la plate-forme de géochimie organique de l'OSU.

De même, un système de pyrolyse multi-shots permettrait d'améliorer l'identification des composés difficilement extractibles en diversifiant nos possibilités actuelles en pyrolyse à point de Curie-GC-MS, appareil acquis également en 2006.

2. Pôle de géochimie inorganique

Le pôle de géochimie inorganique est rattaché au département Biogéochimie de l'UMR. Il fait également partie de la plate-forme analytique de géochimie inorganique de l'OSU ECCE TERRA. Il est géré par un technicien, associé à un adjoint technique, ils travaillent en étroite collaboration avec un maître de conférences spécialisé en chimie analytique minérale.

Les techniques disponibles au sein du pôle permettent de quantifier les éléments majeurs anioniques et cationiques, traces métalliques et non-métalliques, et de réaliser des analyses de carbone et azote à partir d'échantillons variés (eaux, sols, sédiments, végétaux, ...).

Les appareils constituant ce pôle et localisés dans l'UMR sont les suivants : deux chromatographies ioniques (IC), un analyseur de carbone dissous (TC, système catalytique à haute température) depuis peu complété par un analyseur de carbone et azote dissous (TC/TN) acquis en 2016 et co-financé par OSU ECCE TERRA. Un titrateur automatique d'alcalinité acheté en 2016 complète le dispositif.

Les personnels du pôle ont par ailleurs accès aux spectromètre d'émission plasma à couplage induit de dernière génération (ICP-OES) et spectromètre de masse couplé à un plasma inductif (ICP-MS) de la plate-forme d'analyse élémentaire ALLIPP6 inaugurée en 2016 et à laquelle l'UMR est associée. Le nouvel ICP-MS est couplé à une ablation laser pour une caractérisation plus fine des solides.

1IMPMC, MNHN, ISTEP, ENS, CRPG Nancy, Université de Bordeaux, Universités d'Aberdeen, de Namur, de Nairobi, de Zürich, de Bonn

En interne les analyses réalisées au sein du pôle de géochimie organique contribuent à de nombreux projets concernant la géochimie des eaux souterraines au sein de bassins versants, à des projets sur les transferts dans les sols et la végétation... Il est également fortement impliqué dans des projets d'enseignement.

Le pôle est impliqué dans de nombreuses collaborations avec d'autres UMR de l'UPMC (IEES, PHENIX, LOCEAN...) pour lesquelles il réalise également des prestations de service.

3. Pôle développement instrumental

Le pôle de développement instrumental est rattaché au département d'Hydro(géo)logie Physique. Il a pour rôle essentiel la conception et réalisation de nouveaux instruments de mesure, l'équipe se compose d'un ingénieur en électronique et d'un technicien. Le laboratoire d'électronique dispose de divers instruments de mesure permettant la mise au point de prototypes (oscilloscope 1GHz, alimentation, GBF) et de l'équipement permettant la réalisation de circuits imprimés graveuse mécanique LPKF, système de placement CMS avec caméra et four à refusion. Cet équipement permet de tester rapidement de nouveaux circuits. Il dispose également d'un atelier de mécanique.

Le développement de prototypes géophysiques conçus par le pôle instrumental répond au besoin d'améliorer constamment la résolution des mesures et leur capacité à discriminer les réponses physiques indépendantes du sous-sol. Cette discrimination est la clef pour la caractérisation structurale, texturale, hydrique,... du sous-sol à laquelle chaque paramètre physique apparent participe à des degrés divers.

Ce pôle dispose d'une expertise concernant les instruments de mesure de la résistivité électrique que ce soit par contact galvanique (résistivimètre) ou capacitif (électrostatique), et ce pour une mise en œuvre à partir de la surface ou en forage, en mode statique ou bien à l'avancement. Les questionnements scientifiques, à des échelles largement supérieures à celle de la parcelle, nécessitent de développer des instruments spécifiques dit à haut rendement. Dans ce cadre, le pôle travaille également sur la conception de d'instrument électromagnétique « sans contact » permettant de mesurer simultanément les trois principaux paramètres électromagnétiques indépendants : la permittivité électrique, la perméabilité magnétique et conductivité électrique. Ces appareils dit à « induction électromagnétique », que ce soit dans le domaine temporelle ou fréquentielle, permettent d'accéder à une couverture spatiale importante, en particulier lorsqu'ils sont embarqués sur des dispositifs tractés ou aéroportés.

Parallèlement à ces développements « historiques » car se situant dans une perspective à long terme, il est possible grâce au pôle instrumentation de « tester » des concepts plus exotiques s'appuyant sur des mesures multi-physiques simultanées, concepts uniques dans le paysage scientifique en géophysique de proche surface. Par exemple, dans le cadre des travaux sur les échanges nappe-rivière soutenue par le PIREN Seine, le pôle a conçu une sonde destinée à des mesures en forage couplant mesures de température à haute résolution et mesures de résistivités complexes.

La complexité technologique inhérente à ses développements imposent une forte synergie avec des industriels, ce qui se traduit pour le département par une importante part de financement provenant de contrats d'étude scientifique, contrats CIFRE et récemment d'un FUI (fond unitaire interministériel) dans le cadre du projet TEMas (cf FM6 du département HGP).

4. Pôle Microbiologie et Biologie Moléculaire

Le pôle MBM est rattaché au département de Biogéochimie collaborant avec les trois groupes du département Biogéochimie. Il détient une expertise en inventaire microbien des milieux naturels, qu'il s'agisse d'eaux, de sols, de sédiments. Les travaux que nous réalisons s'intègrent à l'approche biogéochimique de l'UMR qui appréhende les milieux d'un point de vue fonctionnel, dans l'objectif de décrire les communautés microbiennes associées à ces processus.

Le pôle est constituée d'un MDC et d'un technicien et recrute régulièrement des Assistant Ingénieurs en apprentissage.

Parmi les types d'approches utilisées en microbiologie environnementale, certaines relèvent de (1) la microbiologie pasteurienne : physiologie microbienne (isolement, suivis de croissance microbienne, numérations, microscopie) ou encore potentialités enzymatiques (galeries API ou Biolog Ecoplate®) ; (2) la biologie moléculaire : extraction puis analyse des acides nucléiques, suivi et abondance de communautés microbiennes fonctionnelles par PCR (quantitative ou non) de gènes cibles, caractérisation des communautés par empreinte moléculaire DGGE (composition et diversité), identification des principaux membres des communautés par (méta)génomique.

Le pôle est équipé de matériel de centrifugeuses mini-centrifugeuses, de 5 Systèmes d'électrophorèse et un système d'acquisition des images, des moyens de conservation des échantillons (congélateurs -30°C, -80°C et container à azote liquide), d'un autoclave, de 4 incubateurs, de tables agitantes, de 2 Sorbonnes et 2 hottes à flux laminaire, de microscopie à fluorescence, d'un spectromètre à micro-plaque adapté au dosage des acides nucléiques, d'un bead-beater. Il possède des systèmes PCR légers et accède à la plate-forme de qPCR de l'IBPS, et est en cours de rattachement à la plate-forme GEMME de l'OSU Ecce Terra.

Nous travaillons sur la diversité de la communauté microbienne dans un milieu, diversité globale ou associée à un processus en particulier ou encore à la densité des micro-organismes en charge des différentes réactions d'un cycle comme celui de l'azote (Dénitrification, Anammox, Nitrification). Une banque de souches de bactéries de l'azote a été constituée, et nous travaillons à l'identification de leurs gènes.

5. Pôle Contaminants Organiques

Le pôle Contaminants Organiques est rattaché au département de Biogéochimie. Il dispose d'équipements permettant de quantifier des molécules organiques (pesticides, plastifiants, antibiotiques, perturbateurs endocriniens,...) présentes à l'état de traces dans différentes matrices environnementales (sédiments, sols, biote, eaux, air).

Un Ingénieur d'Etudes en analyse chimique est responsable de cette plateforme (maintenance, utilisation, réparation, développement) et gère en collaboration avec une technicienne et une adjointe technique la préparation des différents types d'échantillons.

Le pôle est équipé pour :

- la préparation d'échantillons : d'un extracteur automatique par accélération de solvants (ASE350, Thermo) pour les matrices solides et d'un concentrateur automatique d'extraits organiques (EZ-2, Biopharma Technologies).

- l'analyse : d'un chromatographe en phase liquide équipé d'un détecteur à barrettes de diodes et d'un collecteur de fractions (LC-DAD, Shimadzu), d'un chromatographe en phase liquide couplée à un double spectromètre de masse en tandem (LC-MS/MS, Agilent) équipé d'un système d'extraction en ligne (on-line SPE), de deux chromatographes en phase gazeuse couplés avec un spectromètre simple (GC-MS, Agilent) et d'un couplé avec un double spectromètre de masse en tandem. (GC-MS/MS, Agilent).

Lors de ce quinquennal, de nouvelles acquisitions ont permis d'élargir encore plus les possibilités analytique du pôle en renforçant les moyens de préparation des échantillons. Une LC semi-préparative munie d'un détecteur à barrette de diode et d'un collecteur de Fraction (Shimadzu) a été installée en 2012 grâce à un financement de de la plateforme GEORG de l'OSU ECCE TERRA. 29 kE. Un système ASE (Accelerated Solvent Extraction) a été acquis également en 2012 grâce à un financement conjoint de la région et de l'OSU. Un distillateur EZ-2 (Biopharma), acquis par un financement conjoint de la région et de l'EPHE facilite les changements de solvants après extraction. En outre des onduleurs installés en 2014 sécurisent le fonctionnement des spectromètres de masse.

Cette plate-forme est particulièrement utilisée par les enseignants-chercheurs du groupe contaminants organiques du département Biogéochimie qui travaillent sur les transferts dans l'environnement de ces polluants organiques. Des personnes extérieures au groupe utilisent également ces équipements dans le cadre de projets collaboratifs ponctuels.

Le pôle fait du développement méthodologique, puis exploite ces développements dans le cadre de projets de recherche. Par exemple, une méthode d'analyse multi contaminants dans l'air a été développée dans le cadre d'un doctorat qui a été appliqué par la suite à des échantillons d'air fournis par des AASQA. Une autre méthode d'analyse multi-contaminants (composés parents et métabolites) dans des poissons dans le cadre d'un projet avec l'AESN a également été mise au point.

Les différents spectromètres principalement utilisés ont été installés en 2008/2009 ; la question de leur renouvellement commence à se poser aujourd'hui. D'autre part, l'acquisition d'un système à haute résolution de type Q-TOF associée à un LC, qui intégrerait la plate-forme GEORG serait intéressante pour de nombreuses applications (screening de contaminants et métabolites, protéomique dans un cadre écotoxicologie, ...).

6. Pôle Carbone et Nutriments

Le pôle Carbone et Nutriments a pour objectif l'analyse du Carbone et des Nutriments dans différents types d'échantillons (eau, sols et sédiments, air).

Il se fonde sur un assistant-ingénieur, un technicien et deux agents en CDD (actuellement ASI).

Le pôle est équipé de plusieurs appareils pour l'analyse dans différents milieux. Deux chromatographes (Perichrom et Clarus 580) sont destinés à l'analyse des gaz à effet de serre (CO₂, N₂O, CH₄) en phases gazeuses et dissoutes. Deux analyseurs colorimétriques automatisés (Quattro et Gallery) sont destinés à l'analyse des nutriments dissous (NO₃, NO₂, NH₄, PO₄, SiO₂). Le carbone organique (et minéral) est accessible grâce à un analyseur de carbone dissous (Aurora) et un analyseur CHNS Vario El Cube pour l'analyse du carbone particulaire sur les filtres et les sols, en lien avec une micro-balance de précision Mettler-Toledo. Un spectro-fluorimètre (Xenius) est destiné à des analyses de cinétiques enzymatiques et peut être utilisé pour la caractérisation de la matière organique. Un compteur à scintillation Packard, une chambre d'incubation thermostatée et éclairée Sanyo et une Ultracentrifugeuse Avantis J-25 Beckman complètent le dispositif.

Les dernières acquisitions sont le chromatographe en phase gazeuse Clarus 580 acheté en mars 2014 sur les crédits de la convention d'investissement INRA-ABAC et le spectro-fluorimètre Xenius acheté en novembre 2015 sur les crédits de R2DS Île-de-France et une participation de l'OSU

L'ensemble des appareils sont utilisés par l'équipe technique du pôle pour effectuer des analyses dans le cadre des programmes ABAC (Région IdF-Eau de Paris et AESN), Escapade (ANR), C-Cascade (ITN-EU), EFEMAIR et Hydroges (ADEME), FLAM (Liteau), NEREIS (GIP-SA) et Piren-Seine (AESN-SIAAP-VNF-Grands Lacs de Seine et autres partenaires).

Les développements envisagés concernent le remplacement du compteur à scintillation pour un PICARO (passage de l'utilisation de traceurs radioactifs à des traçage par des éléments stables). Deux appareils à renouveler en priorité sont le spectrophotomètre (très ancien et défectueux), et l'analyseur CHNS Vario à remplacer par un système LECO plus souple d'utilisation.

7. Pôle instrumentation terrain

L'UMR Metis attache une grande importance à sa capacité à déployer efficacement des campagnes de terrain. Les deux départements Biogéochimie et Hydrologie-hydrogéologie-géophysique de l'UMR 7619 METIS ont toujours maintenu et enrichi un parc instrumental de terrain pour la réalisation de ses projets de recherche alliant l'expérimentation, l'observation et la modélisation. Ces appareils sont principalement des appareils commerciaux, mais il existe aussi, en géophysique, des prototypes développés à l'UMR 7619 METIS. Ce parc instrumental est parfois

co-financé par des structures plus larges, comme l'OSU Paris-Centre (depuis 2010) ou la FR-FIRE (depuis 2007), mais aussi par les filières d'enseignement.

Le matériel de cette plateforme est principalement utilisé sur les sites de l'Observatoire de la Zone Critique (IA-Critex, notamment le site de l'Orgeval), sur les sites de la Zone Atelier Seine (CNRS) et ceux du réseau d'exploitations agricoles ABAC (IDF-AESN-EdP) et le site de Saint-Martin le Noeud. Certains appareils sont régulièrement partagés au sein du réseau Geofcan (« Géophysique des Sols et des Formations Superficielles », qui regroupe les géophysiciens de l'UPMC, du BRGM, de l'INRA, de l'IRD, de l'IRSTEA et de l'Université Paris-Sud Orsay depuis 1997). Une location est proposée occasionnellement à des collègues ou des industriels, à des conditions financières différentes.

Le nombre d'appareils est d'environ une centaine, allant de la biogéochimie à la géophysique de proche surface, en passant par l'hydrogéologie et l'hydrologie.

Au sein de ce parc instrumental, on compte des stations météo (Campbell et Watchdogs). Des installations piézométriques équipées de capteurs permettent de documenter en continu les variations de hauteur de nappe et les caractéristiques physico-chimiques (température, pH conductimétrie) des eaux souterraines.

l'UMR possède également un stock d'environ 800 bougies poreuses pour accéder aux concentrations sous racinaires des sols, des chambres à accumulation automatiques pour la mesure des gaz à effet de serre d'origine agricole, un analyseur de gaz INNOVA MODELE 1412-5 (NH₃, CH₄, CO₂, N₂O), une sonde NIRS de caractérisation des sols, une sonde X de détermination de divers éléments des sols, un préleveur de gaz dans les horizons de sols, un tracteur, des outils radar de sol et méthode électrostatique développés en interne,

Le parc instrumental géophysique comprend la plupart des outils habituels de la prospection et se révèle sans égal dans le paysage universitaire français. Il intègre notamment :

- des instruments de l'imagerie électrique (2 résistivimètres multi électrodes à 48 et 192 électrodes, 1 résistivimètre de polarisation provoquée spectrale 10 canaux, divers instruments de cartographie électrique de type Geoscan-RM15 ou équivalent) et plusieurs dizaines d'électrodes impolarisables Pb-PbCl₂ ;
- des appareils de cartographie électromagnétiques Slingram (EM31, CMD-Explorer, CMD mini-Explorer) ;
- au moins 4 équipement de sondage électromagnétique dans le domaine temporel couvrant quasiment l'ensemble des constructeurs du marché,
- 4 magnétomètres à proton ou à vapeur de césium (EDA, G856, G858, en configuration gradientomètre) ainsi que des susceptibilimètres ,
- un microgravimètre CG5 ;
- un laboratoire d'acquisition sismique avec environ une centaine de géophones en composantes verticales ou horizontales et différentes sources sismiques (chute de poids accélérée PEG40, fusil « buffalo gun » ;
- différents radar-sol couvrant les fréquences de 50 MHz à 1 GHz pour des applications allant de la géologie et la glaciologie jusqu'au génie civil et la pédologie ;

Ce matériel s'accompagne de moyens de repérage et de positionnement (appareil de nivellement, station totale, GPS différentiel bi-fréquence temps réel, GPS portables...), de tablettes et d'ordinateurs durcis, de moyens de liaison radios...

Pour les eaux de surface, on dispose de plusieurs débitmètres, de plusieurs autres sondes Oxygène-Température-pH-conductimétrie-salinité, de deux sondes multiparamètres, incluant la fluorescence et la turbidité (YSI....), d'une sonde LICOR de mesure de pénétration de la lumière, de deux sondes LICOR de mesures de pCO₂, de systèmes de prélèvement manuels et automatiques. Selon les années l'UMR dispose de 2 ou 3 véhicules, quelle utilise pour environ 30000-40000 km, surtout sur le bassin de la Seine.

Au cours du mandat (2014-2019), ces instruments ont été mobilisés dans le cadre de projets du PIREN-Seine, du GIP-Seine Aval, des projets du réseau ABAC, EFEMAIR et HydroGES (ADEME), FLAM (Liteau), C-CASCADES (ITN-EU), et quasiment l'intégralité des activités du groupe de géophysique, y compris celles liées à la pédagogie (niveau licence, master)

Nous prévoyons de compléter le parc instrumental avec notamment des appareils utiles pour des projets collaboratifs entre les différents labos, mais aussi avec des outils de mesures de propriétés physiques des sols (écoute sismique, dispositifs de mesures des propriétés magnétiques multifréquentiels...), biogéochimiques en rivière (cloches benthiques pour processus sédimentaires, granulomètre Laser, lysimètres, stations météo...).

8. Service informatique

La mission du service informatique du laboratoire consiste à administrer son système d'information et gérer son parc informatique. Il remplit également des fonctions support en matière de bases de données géographiques et de cartographie (réalisées par un ingénieur dédié), ainsi que quelques développements logiciels. Il est en charge de la sécurité des systèmes informatiques de l'unité.

L'UMR possède plusieurs serveurs informatiques sur lesquels différents services sont utilisés par les personnels du laboratoire. Ainsi, le service informatique a en charge l'administration de 18 serveurs physiques dont 6 affectés à des équipes pour leurs besoins propres. 12 serveurs physiques sont utilisés pour la gestion de son système d'information basé sur les services suivants :

- deux serveurs de fichiers, un serveur de supervision (Nagios), un serveur de contrôle de la température de la salle informatique,
- un Active Directory (AD), un serveur DNS et d'impression, un serveur DHCP, trois serveurs de licences (Mathworks MatLAB, ESRI ArcGIS et JetBrains pyCharm), un serveur pour la gestion des sauvegardes du laboratoire de 63 To,

- un serveur de planification de ressources (GRR) et de sondages (Framadate), deux serveurs FTP, plusieurs serveurs web (pour des parcours de master, pour des programmes tels que le PIREN-Seine ou le site de la FIRE, pour des projets).

Le service informatique gère les 6 bornes wi-fi du laboratoire. Il assure l'interface avec les services externes proposés par l'UPMC et le CNRS et utilisés par les personnels du laboratoire (annuaire, service mail, VPN, réseau filaire et VLAN, gestion de listes.

Le service informatique assure le fonctionnement des serveurs dédiés au calcul (voir pôle modélisation et méthodes)

Enfin, le service informatique a en charge la gestion au quotidien d'un parc hétérogène composé par un peu plus de 200 ordinateurs, d'imprimantes, de 3 photocopieurs multifonctions, d'un système de visioconférence Polycom et de 2 systèmes d'audioconférence Polycom. Les ordinateurs des personnels de l'UMR sont équipés dans 95 % des cas du système d'exploitation Microsoft Windows 7, pour les autres ils fonctionnent à l'aide de GNU/Linux (Debian ou Ubuntu). Aucun poste sous Apple MacOS n'est installé par le service informatique. Chaque personne a pour travailler un ordinateur (fixe dans 80 % des cas) et/ou un portable. Certains postes fixes ou portables connectés à des appareils de mesures, pour ceux qui fonctionnent avec un système d'exploitation non maintenu par l'éditeur, sont déconnectés du réseau pour des raisons de sécurité.

9. Pôle Modélisation et méthodes numériques

Au sein du groupe de géophysique elle concerne le traitement de toutes les données collectées en général par des méthodes inverses, au sein du groupe d'hydrologie et hydrogéologie elle concerne le calage régional de modèles hydrologiques, des simulations hydro-climatiques généralement réalisées sur des serveurs externe mais aussi le traitement et l'exploitation des sorties des modèles, des simulation hydrogéologiques, au sein du groupe carbone et nutriments et avec la FIRE sont développés des modèles de circulation des composés biogéniques.

La modélisation est largement pratiquée au sein des deux départements. Le groupe de géophysique, élabore des codes de traitement de toutes les données collectées, en général par des méthodes inverses. Le groupe d'hydrologie et hydrogéologie s'attache à l'utilisation, au calage et couplage régional de modèles hydrologiques, ce qui en collaboration avec MétéoFrance et l'IPSL nécessite des simulations hydro-climatiques généralement réalisées sur des serveurs externe, mais aussi le traitement et l'exploitation des sorties des modèles, des simulation hydrogéologiques, ...). Le groupe carbone et nutriments, en collaboration avec la FIRE a développé un modèle de circulation des composés biogéniques dans le continuum terre-mer.

Bien que les structures et objectifs des modèles soient assez différents, ils partagent un certain nombre méthodes liées au styles et langages de programmation, aux techniques d'optimisation, aux interfaces notamment pour des données spatialisées, et des interfaces ont commencé à être développés en vue de l'intégration/couplage de ces différents modèles (ex : hydrologie régionalisée et biogéochimie), mais l'absence de moyens humains dédiés ne permet pas de rendre visible une démarche et des outils pourtant novateurs.

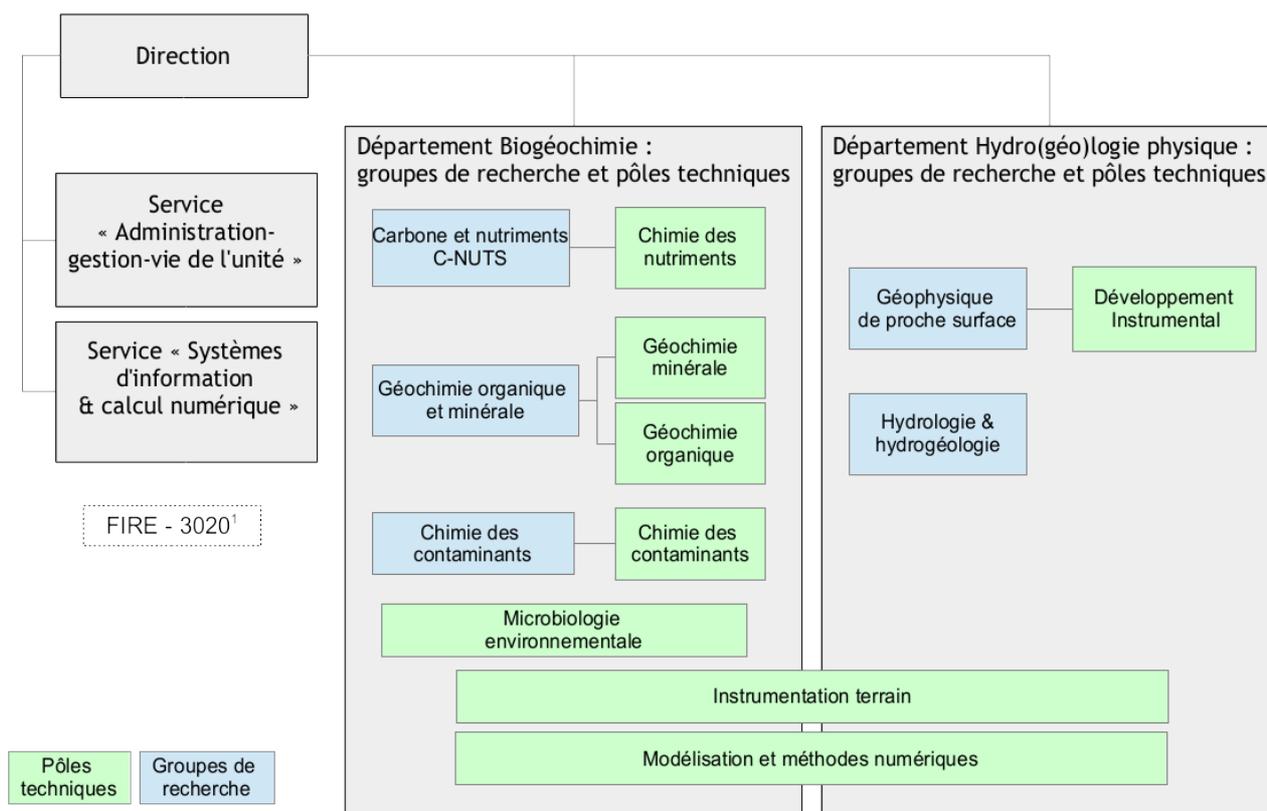
Cependant, les chercheurs concernés ont commencé à fédérer leurs moyens de calcul. Ainsi, 6 serveurs sont dédiés au calcul scientifique, 5 sont des serveurs de calcul et 1 est un serveur logiciel. 14 machines de calcul sont regroupées en cluster (486 coeurs). Le système comprend également 3 baies de stockage d'une capacité actuelle de 80 To.

Ce pôle est appelé à se développer au cours du prochain contrat quinquennal dans le cadre d'une réflexion à mener avec nos partenaires notamment au sein de l'IPSL.

Annexe 3 : Organigramme fonctionnel

Au cours du projet quinquennal précédent, l'UMR Metis a choisi de se structurer selon deux départements, chargés d'une mission d'animation scientifique, et regroupant des groupes de recherche structurés pré-existants (en bleu). Chaque pôle technique (en vert) est en général associé à un groupe de recherche qui lui apporte un soutien scientifique spécifique, contribue à son équipement via des projets et est un utilisateur principal du pôle. Le pôle de microbiologie environnement collabore fortement avec tous les groupes de recherche de son département. Les pôles « instrumentation terrain » et « modélisation et méthodes numériques » comme le service informatique et le service administratif travaillent pour toute l'UMR.

ORGANIGRAMME FONCTIONNEL DE L'UMR 7619 METIS



¹. L'UMR Metis accueille la fédération FIRE - 3020