



Département d'évaluation de la recherche

DOCUMENT D'AUTOÉVALUATION DES UNITÉS DE RECHERCHE

CAMPAGNE D'ÉVALUATION 2023-2024
VAGUE D

Mai 2023

TABLE DES MATIÈRES

1- INFORMATIONS GÉNÉRALES POUR LE CONTRAT EN COURS.....	4
1- Identification de l'unité.....	4
2- Présentation de l'unité.....	4
3- Les thématiques scientifiques et leurs enjeux.....	6
4- Profil d'activités liées à la recherche	8
5- Environnement de recherche.....	9
2- INTRODUCTION DU PORTFOLIO.....	13
Éléments METIS.....	13
Éléments du département H2GS2.....	13
Éléments du département BIOGEO.....	14
3- AUTOÉVALUATION DU BILAN.....	16
3-1 Autoévaluation de l'unité.....	16
Domaine U1. Profil, ressources et organisation de l'unité.....	16
Domaine U2. Attractivité.....	18
Domaine U3. Production scientifique.....	21
Domaine U4. Inscription des activités de recherche dans la société.....	23
3-2 Autoévaluation de l'équipe BIOGEO.....	25
Domaine B1. Profil, ressources et organisation de l'équipe.....	25
Domaine B2. Attractivité.....	26
Domaine B3. Production scientifique.....	28
Domaine B4. Inscription des activités de recherche dans la société.....	29
3-3 Autoévaluation de l'équipe H2GS2.....	30
Domaine H1. Profil, ressources et organisation de l'équipe.....	30
Domaine H2. Attractivité.....	32
Domaine H3. Production scientifique.....	34
Domaine H4. Inscription des activités de recherche dans la société.....	35
4- TRAJECTOIRE DE L'UNITÉ.....	36
4-1 Bilan scientifique.....	36
Bilan du département BIOGEO - Biogéochimie.....	36
Bilan du département H2GS2 - Hydrologie, Hydrogéologie et Géophysique de Sub-Surface.....	42
Bilan des projets transversaux.....	50
4-2 Vers une nouvelle organisation.....	52
Forces-Faiblesses-Opportunités.....	52
Une organisation repensée, autour de 5 équipes.....	53
Menaces et opportunités lors du prochain quinquennal.....	55
4-3 Projet scientifique (2025-2029).....	56
DYNAMO : Dynamique spatio-temporelle de la matière organique - Resp.: A. Huguet.....	56
Géophysique - Resp. : L. Bodet.....	57
Hydrosystèmes- Resp. : L. Oudin.....	59
SO(i)LS : Study Of physico-biogeochemical processes in Soils - Resp: D. Jougnot.....	60
TRACES - Resp. : E. Guigon.....	61

Ce document est complété par 3 Annexes en pdf et deux tableaux Excel :

- Annexe 1 Production scientifique - Période 2017-2022
- Annexe 2 Liste des acronymes
- Annexe 3 Organigramme prévisionnel au 01/01/2025
- Données de caractérisation et de production
- Production scientifique selon HAL

1- INFORMATIONS GÉNÉRALES POUR LE CONTRAT EN COURS

1- Identification de l'unité

Nom de l'unité : Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols

Acronyme : METIS

Label et numéro : UMR 7619

Domaine scientifique principal :

Sciences du vivant et environnement

Panels scientifiques par ordre décroissant de pertinence :

Panel 1

ST3 - Sciences de la terre et de l'univers

Panel 2

ST4 - Chimie

Panel 3

SVE1 - Biologie environnementale fondamentale et appliquée, écologie, évolution

Panel 4

SHS7 - Espace et relations hommes/milieus

Équipe de direction :

L'équipe de direction est constituée de Jean-Marie Mouchel (DU), Agnès Ducharne et Hélène Blanchoud (DU adjointes). Chacun des DU et DU-adjoints est chargé du pilotage des relations avec la tutelle dont il dépend. Agnès Ducharne est également chargée des relations avec l'IPSL. Hélène Blanchoud est également responsable du département BIOGEO.

L'équipe de direction est également constituée de Ludovic Bodet, responsable du département H2GS2 et de Valérie Girard, responsable administrative de composante.

Liste des tutelles de l'unité de recherche :

SU (tutelle hébergeante), CNRS (INSU, INEE, INC), EPHE

Nos instituts de rattachement CNRS ont évolué durant la période. En 2017, notre institut de rattachement principal était l'INEE, avec l'INSU et l'INC en rattachement secondaire. A notre demande, l'INSU est devenu deuxième institut principal de METIS en 2020 pour devenir notre seul institut de rattachement principal en 2022.

Écoles doctorales de rattachement :

L'UMR METIS est rattachée principalement à ED GRNE (398), Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement. Ses enseignants chercheurs de l'EPHE sont rattachés à la mention SIEB (Systèmes intégrés, environnement et biodiversité) de l'ED 472 de leur établissement de rattachement.

2- Présentation de l'unité

Historique, localisation de l'unité :

L'UMR 7619 METIS a été créée en 2014 à partir de l'UMR 7619 Sisyphe et de l'équipe GOME (Géochimie Organique et Minérale de l'Environnement), issue de l'ancienne UMR Bioemco. La recomposition du paysage de la recherche en Ile de France avait alors amené l'Ecole des Mines à privilégier des unités propres, et ne plus être tutelle de l'unité. L'UMR METIS a ensuite été reconduite à l'identique en 2019.

Auparavant, l'UMR Sisyphé avait été créée en 1997 par le rapprochement du Laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université Paris 6 et du Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines. 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.

L'unité est entièrement hébergée par Sorbonne Université, et localisée sur le site de Jussieu (campus Pierre et Marie Curie).

Organisation de l'unité :

L'UMR METIS est composée de deux départements, BIOGEO (Biogéochimie) et H2GS2 (Hydrologie, Hydrogéologie et Géophysique de Sub-Surface). Chacun des départements est organisé en plus petits groupes de recherche : "hydro" et "géophysique" pour le département H2GS2, et "carbone et nutriments", "contaminants organiques" et "géochimie organique et minérale" pour le département BIOGEO.

Une équipe de gestion centralise toutes les opérations de gestion administrative et financière. Elle est composée de 3 ETP, dont la responsable administrative de l'unité qui pilote l'équipe, et un poste vacant ce jour mais susceptible d'être rapidement remplacé. 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 de ressources humaines.

Notre service informatique (salle serveurs, machines de calculs, dispositifs de sauvegarde, support de sites web) a été considérablement réduit avec le départ non remplacé de notre ASR en 2019. Nous sommes aujourd'hui dans une situation où le fonctionnement de notre système informatique est considérablement dégradé avec des risques majeurs de défaillance. Plusieurs fonctions, sites web en particulier, ont pu être délocalisées. Le recrutement très récent d'un AI par Sorbonne Université, AI partagé avec une autre unité, devrait nous permettre de reconstituer un système informatique solide, mais dont l'ampleur sera nécessairement réduite. Ce service comprend également un IE en charge des systèmes d'information géographique et des bases de données.

Équipes, plateformes, services communs, etc. :

L'UMR METIS comprend plusieurs pôles techniques. Il s'agit de pôles analytiques pour la plupart mais aussi d'un pôle de développement instrumental, et d'un pôle portant l'instrumentation de terrain (en géophysique, en hydrologie et en géochimie). Chacun des pôles analytiques (« chimie des nutriments », « géochimie organique », « géochimie minérale », « contaminants » et « microbiologie ») fonctionne en étroite interaction avec un des groupes de recherche avec lequel il travaille particulièrement. Le pôle de microbiologie fonctionne de manière autonome, collabore avec les différents groupes de recherche de l'unité.

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 » 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 à l'extérieur, des équipements pour la mesure en hydrologie et les prélèvements, des équipements pour la biogéochimie (capteurs). Aujourd'hui, ces pôles intègrent des personnels recrutés par l'OSU ou l'UFR et sont affectés à plusieurs missions.

Plusieurs des pôles techniques sont associés aux plateformes de l'OSU Ecce Terra (pôles de géochimie organique et pôle chimie des contaminants organiques avec la plateforme GEORG de l'OSU, pôle instrumentation terrain avec la plateforme instrumentation "terre-mer-sol" de l'OSU, pôle géochimie minérale relié à la plateforme ALLIP6 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. Les plateformes de géochimie organique et de chimie des contaminants sont également intégrées dans le réseau CNRS INSU RÉGEF.

Effectif de l'unité et de ses éventuelles équipes au 31/12/2022 :

Département H2GS2 : 28 personnes, dont 12 enseignants-chercheurs, 3 chercheurs, 2 ingénieurs et techniciens titulaires et 1 CDD, 4 post-docs et ATER, 6 émérites et associés, auxquels s'ajoutent 14 doctorants.

Département BIOGEO : 35 personnes dont 12 enseignants-chercheurs, 3 chercheurs, 7 ingénieurs et techniciens titulaires et 3 CDD, 4 post-docs et ATER, 6 émérites et associés, auxquels s'ajoutent 7 doctorants

Hors départements : 5,5 ingénieurs et techniciens titulaires et 5 CDD et bénévoles.

Les effectifs de l'unité au 31/12/2022 sont donc de 24 enseignants-chercheurs, 6 chercheurs (soit un total de 18 ETP-chercheur), 14,5 ingénieurs et techniciens titulaires et 9 CDD et bénévoles, 8 post-docs et ATER, 12 émérites et associés et 21 doctorants, soit 44,5 permanents et 50 CDD et associés.

Thématiques scientifiques (par équipe le cas échéant):

BIOGEO :

- Dynamique temporelle : paléoreconstructions et trajectoires
- Caractérisation des environnements naturels et anthropisés
- Interactions biogéochimiques et rôle du vivant
- Continuum Sol-Eau/Terre-Mer : de l'expérimentation à la modélisation

H2GS2 :

- Modèles et processus : continuum eaux souterraines - eau de surface – atmosphère
- Impacts anthropiques sur les hydrosystèmes et le climat / Trajectoires
- Caractérisation de la zone critique
- Hydrogéophysique et processus
- Méthodes et imageries géophysiques
- Développements expérimentaux et instrumentaux en géophysique

3- Les thématiques scientifiques et leurs enjeux

La thématique centrale de l'UMR METIS concerne l'étude 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 fondamentale 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 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...). Nous nous situons résolument dans le domaine des Surfaces et Interfaces Continentales (SIC), domaine dans lequel nous intégrons la surface (occupation et usage des terres), le sol et la zone non-saturée, et auxquels 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 amenés à nous impliquer dans des projets portant sur la Zone Critique (ZC) qui se sont développés à l'échelle nationale et européenne au cours des dernières années.

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, zones urbanisées, cours d'eau, vallées alluviales, zones humides, aquifères...). Elles incluent une analyse du fonctionnement de la société dans ses interactions avec son environnement, ce qui permet d'étayer des travaux prospectifs et rétrospectifs. 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...). Nos compétences en géophysique permettent également la caractérisation du système physique dans lequel se déroulent circulations et processus.

Un point fort de l'unité est d'être capable de proposer des approches pluridisciplinaires. Au cours de la dernière période plusieurs séries d'avancées ont permis de progresser, avec (i) le développement de projets dans le domaine de l'hydrogéophysique, portés notamment par un MCF récemment recruté (**PF7**, thèse B. Loiseau) et qui concernaient aussi le développement d'une méthode basée sur la sismique pour évaluer les hauteurs de nappe de proche surface ou des couplages sismique/électrique (**PF6**, thèse de M. Dangeard, Blazevic et al., 2020), (ii) plusieurs projets sur l'antibiorésistance au sein desquels travaillent conjointement l'équipe contaminants et les collègues microbiologistes de l'université de Rouen associés à l'UMR (Colin et al., 2021, 2022, Goulas et al. 2020) (iii) des projets couplant l'étude des circulations souterraines et le transfert des contaminants initiés à partir de notre site-atelier de Saint Martin le Noeud (**PF2**) et prolongés avec des travaux sur les systèmes d'infiltration d'eaux usées traitées (avec le BRGM, site d'Agon en Normandie, thèse de Quentin Guillemoto, Guillemoto *et al.*, 2022) qui se prolongent aujourd'hui par le projet COMAIRS déposé au PEPR One Water et porté par notre unité et (iv) la création de la jeune équipe "geoprocess" qui a vocation à coupler les processus physiques, chimiques et microbiologiques dans les sols et qui continuera à se développer dans le futur quinquennal au sein de l'équipe SO(i)LS. Nous avons par ailleurs été très fortement moteur au sein du projet Obepine (suivi du virus SARS-CoV2 dans les eaux usées des villes françaises, (Wurtzer *et al.*, 2020, Marechal *et al.*, 2021, le projet a donné lieu à la constitution d'un GIS éponyme présidé par SU), qui inclut des hydrologues, des virologues, des mathématiciens et des épidémiologistes. Nous continuons également à développer des approches associant chimie des contaminants et santé des populations et des écosystèmes avec des travaux sur l'exposition des populations humaines à la contamination atmosphérique (thèse de Diane Le Bayon, 2022), sur l'impact des interactions trophiques sur l'accumulation des contaminants (thèse de Noëlie Molbert, Molbert et al., 2020, 2022), les relations hôte - parasite chez les poissons d'eau douce (projet ANR JCJC démarrant en 2023) et celui de la contamination sur le comportement des cistudes en Camargue (projet ECOPHYTO CISTOX).

Plusieurs autres nouvelles orientations ont été particulièrement développées au cours de la période. Au sein de l'étude des transferts de carbone et de nutriments au sein des bassins versants, l'analyse des conséquences de ces flux et processus sur les émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O) a été considérablement renforcée au travers des thèses d'Audrey Marescaux et Xingchen Yan (**PF10**, Marescaux *et al.*, 2020, Yan *et al.*, 2022), alors que les travaux consacrés à la prospective des territoires et de l'utilisation des terres pour la production agricole et l'alimentation ont continué à être développés selon le continuum homme-terre-mer en interaction avec des acteurs de l'eau et de l'agriculture (Romero *et al.*, 2022, Barataud *et al.*, 2022, Le Noe *et al.* 2019). L'histoire et le devenir des territoires, examinée au prisme de différentes problématiques (agriculture et alimentation, contamination chimique, ressources hydriques, biodiversité, eau et santé...) est une thématique majeure du programme PIREN-Seine dans lequel l'UMR est toujours très impliquée, après l'avoir fondé il y a plus de 30 ans (**PF1**).

Dans le domaine de l'hydrogéologie, au-delà du site atelier de St Martin le Noeud, une série de travaux consacrés à des milieux d'intérêt particulier a été lancée, notamment dans le domaine de l'après mine qui couvre un ensemble varié de contextes hydrologiques, hydrogéologiques et industriels (Plagnes et al., 2017, L'Hermite et al., 2022). D'autres terrains ont également été explorés comme un très grand volcan en Indonésie, qui constitue une ressource en eau de grande importance pour la région (Dumont et al., 2021, 2022), et les aquifères de socle de l'Afrique subsaharienne dont l'importance est considérable également (Dibi et al., 2021). La reconnaissance de l'UMR sur cette thématique est marquée notamment par son implication dans la récente conférence de l'Unesco tenue à Paris en 2022 (**PF9**). A l'échelle globale ou à l'échelle de grandes régions du monde, nos travaux sur les interactions entre climat et circulation des eaux souterraines, y compris les circulations forcées par l'irrigation, ont beaucoup progressé au travers de plusieurs doctorats et projets internationaux (projet ANR international I-GEM, projet Belmont forum BLUEGEM, portés par une chercheuse de notre unité (**PF8**, Lan et al., 2022, Al-Yaari et al., 2022)). La modélisation déterministe et les méthodes de l'hydrologie statistique sont mobilisées dans ces travaux. Notre contribution au PEPR TRACCS permettra de prolonger encore ces travaux dans le futur.

Des travaux en mésocosme de longue durée ont permis d'identifier le rôle des champignons et des vers de terre sur les transferts et transformations de la matière organique via le traçage isotopique des apports de litière (**PF13**). Ces travaux trouvent un écho dans ceux du groupe Geoprocess précédemment cité qui s'est intéressé au devenir de molécules spécifiques que sont les HAP en étudiant par une approche pluridisciplinaire (microbiologie, chimie et géophysique) le rôle de bactéries et de champignons sur les transformations. Cette convergence se retrouvera dans la structuration future de l'UMR.

Nous continuons également à progresser dans l'évaluation du potentiel de molécules d'origine bactérienne pour l'identification des paléoenvironnements en milieu continental (PF12, Harrault et al., 2022, Vequaud et al., 2021, 2022, Huguet et al. 2019), ces travaux contribuent à ancrer notre unité au sein de l'IPSL. Nos contributions aux travaux de l'IPSL sont multiples et en plein développement, elles portent sur les paléoenvironnements, sur l'étude des formes réfractaires du carbone organique (Baton *et al.*, 2017, Mouraux *et al.*, 2022), et leur stockage potentiel dans les sols, sur les trajectoires de l'alimentation des hommes (Garnier *et al.* 2021, Billen et Garnier, 2021) et leurs conséquences sur les émissions de gaz à effet de serre, et bien entendu sur la simulation climatique globale (pré-citée) incluant la prise en compte des eaux souterraines et d'autres activités humaines (le développement urbain en particulier, Saadi *et al.*, 2021). Nos chercheurs co-animent deux des groupes de travail de l'EUR-IPSL consacrés à l'eau et au carbone en milieu continental.

Au-delà de nos efforts pour faire progresser une approche couplant contaminants et One Health, nos travaux sur les contaminants ont été en partie focalisés sur l'étude d'archives sédimentaires fluviales pour des séries de produits encore peu étudiés dans ses milieux (PF11). Au sein de l'unité, ces travaux confortent une compétence reconnue en histoire de l'environnement (Flipo *et al.* 2020, Le Pichon *et al.*, 2020, Dmitrieva *et al.*, 2018), qui fait écho aux travaux plus prospectifs que nous menons dans le domaine du climat, de la production agricole et de l'utilisation des terres. Cette compétence permet ici d'associer les traces de contaminants identifiées dans les sédiments à l'utilisation de ces produits par la société (ANR trajectoire, Legrand *et al.*, 2020).

Si notre savoir-faire dans le domaine de la géophysique permet de développer des approches pluridisciplinaires, notamment dans le domaine de l'hydrologie et de l'archéologie (Simon *et al.*, 2020, Vella *et al.*, 2019, Guerin *et al.*, 2022, Hulin *et al.*, 2021), Geoprocess et approches pluridisciplinaires prennent une dimension croissante, mais nous continuons à développer les méthodes géophysique et leur couplage pour renforcer notre savoir-faire reconnu au niveau européen (PF5, ITN-Enigma, Solazzi *et al.*, 2021, Martin *et al.* 2019, Rembert *et al.* 2022, Thiesson *et al.*, 2017). L'intérêt multiple de ces méthodes dans le monde industriel est marqué par plusieurs conventions industrielles et montages CIFRE, qui concernent l'analyse de sous-sol et de sa stabilité par des méthodes sismiques ou la caractérisation à distance de ses propriétés physiques (SNCF, EDF).

L'UMR METIS demeure très impliquée dans la vie académique et dans la vie de la cité. Les chercheurs de l'unité ont des responsabilités au sein des instances académiques (CS INSU, CS SIC, CS AgroParisTech, CS ENGEES) au sein de plusieurs sociétés savantes nationales (membres de l'académie d'agriculture de France, Association des Géochimistes Organiciens Francophones, Groupe Français des Pesticides, Société Géologique de France, Société Hydrotechnique de France, AGAP qualité) et internationales (International Association of GeoChemistry, European Association of Organic Geochemists, European Association of Geoscientists and Engineers, American Geophysical Union). Ils contribuent également aux conseils scientifiques d'institutions chargées de la gestion de l'environnement (SIAAP, AESN, Grotte de Lascaux, BRGM...).

Enfin, bien que cette évaluation de l'unité porte seulement sur les aspects recherche et formation par la recherche de nos travaux, rappelons que nos enseignants-chercheurs sont très impliqués dans les formations consacrées à l'environnement à Sorbonne Université et à PSL (l'EPHE fait partie de PSL) pour l'enseignement mais aussi pour le pilotage des formations et la création de nouvelles formations (PF3).

4- Profil d'activités liées à la recherche

Activités (Répartir 100 points sur ces 7 items)	UMR	BIOGEO	H2GS2
Administration et animation de la recherche : pilotage de la recherche (VP, direction d'institut, DAS, par exemple), participation à des instances d'évaluation (CNU, CoNRS, CSS, Hcéres, par exemple), responsabilité de dispositifs Idex ou Isite, direction de projets (ANR, Horizon Europe, ERC, CPER, PIA, France 2030, par exemple), responsabilités éditoriales dans des revues ou collections nationales et internationales.	20	20	20

Aide aux politiques publiques et expertise technique : pouvoirs publics aux niveaux européen, national et régional, entreprises, instances internationales comme FAO, OMS, etc.	20	25	15
Contribution à l'adossement d'enseignements innovants à la recherche : EUR, SFRI, etc.	5	5	5
Dissémination de la recherche : partage de connaissances avec le grand public, médiation scientifique, interface sciences et société.	10	10	10
Recherche et encadrement de la recherche.	40	40	40
Valorisation, transfert, innovation.	5	0	10
Autres activités.	0	0	0

5- Environnement de recherche

L'UMR METIS est très bien implantée dans un riche réseau de structures de recherche et valorisation liées à sa tutelle hébergeante SU et à l'INSU : METIS héberge la fédération [FIRE](#) depuis sa création, où nous contribuons à de nombreux projets de recherche liés aux sols et à l'agronomie ; METIS est aussi un membre actif de la fédération [IPSL](#) et de son EUR, par l'animation de deux thèmes de recherche (Biogéochimie terrestre, écosystème et agriculture ; et Cycle de l'eau), la contribution à plusieurs projets de "services climatiques" dans le domaine de l'eau, ainsi qu'au modèle de climat de l'IPSL, via sa composante de surface [ORCHIDEE](#) ; au sein de l'OSU [Ecce Terra](#), nous portons enfin deux plateformes, en géochimie organique et en géophysique, avec l'accueil depuis décembre 2022 d'un IR dédié à cette dernière. L'OSU Ecce Terra est étroitement associé à l'[UFR TEB](#) (Terre Environnement Biodiversité) à laquelle sont rattachés la plupart de nos enseignants-chercheurs (sinon rattachés à l'École Polytech de SU). Cette UFR contribue largement à l'[Institut de la Transition Environnementale](#) (ITE) de l'Alliance SU, et METIS participe à cette dynamique (bureau de l'ITE et projets de recherche et de formation). Grâce à sa tutelle EPHE, l'UMR METIS est aussi impliquée dans un certain nombre de programmes de recherche de [PSL](#) (par exemple [The future of Urban Waters](#)).

Au niveau national, nous sommes aussi partie prenante de l'IR [OZCAR](#) (portage du WP Instrumentation et participation aux SNOs [ORACLE](#), Karst, et [H+](#)) et du réseau [RÉGEF](#) (animation des activités de géochimie organique). Enfin, depuis leur création, nous pilotons l'association nationale [GEOFCAN](#) qui regroupe les principaux spécialistes en géophysique de subsurface en France (BRGM, INRAe, IFSSTAR, Universités), ainsi qu'au réseau des Zones Ateliers de l'INEE, via la [ZA Seine](#), étroitement associée à plusieurs clusters régionaux en partenariat avec des acteurs publics et privés de la gestion de l'eau. Le plus ancien est le programme [PIREN-Seine](#), dont METIS est un acteur majeur depuis 30 ans ([PF1](#)), suivi par le [GIP Seine-Aval](#), et l'observatoire de la qualité de l'eau [MeSeine](#) en collaboration avec le SIAAP. Au-delà des recherches sur l'eau et sa qualité qui sont extrêmement structurantes pour l'UMR METIS, nous contribuons aussi à la recherche francilienne via notre participation à deux DIM (Domaines d'intérêt majeurs) de la région ([MAP](#) Matériaux anciens et patrimoniaux et [Qi2](#) Qualité de l'air, Impacts sanitaires, et Innovations technologiques et politiques).

Notre implication dans des dispositifs du PIA passe par les structures déjà mentionnées : l'IR OZCAR pour les Equipex [CRITEX](#) (portage de 2 WPs) du PIA1 et [TERRA FORMA](#) (portage d'une tâche du WP2.7), et l'IPSL via son EUR (portage de 2 thèmes, commission enseignement, et montage d'UE). Nous participons aussi à trois PEPR : avec des portage de tâches/WPs dans des projets ciblés des PEPR FairCarbon et TRACCS, et des projets soumis aux PEPRs OneWater et FairCarbon. Pour la valorisation, notre UMR fait partie du second cercle de l'[Institut Carnot Eau & Environnement](#). Ses domaines d'activités sur la qualité de la ressource, la gestion de l'eau et du changement climatique, recouvrent nombre des nôtres et nous aimerions que nos tutelles soutiennent notre accession au premier cercle.

Enfin, une part substantielle de notre environnement de recherche est apportée, pour nos activités de modélisation, par les centres de calcul nationaux du [GENCI](#) et les mésocentres [ESPRI](#) de l'IPSL et [MeSU](#) à SU. Ces centres offrent aussi des moyens pour l'Intelligence Artificielle, complétés à SU par le centre [SCAI](#) (Sorbonne Center for Artificial Intelligence).

6- Prise en compte des recommandations du précédent rapport

Un certain nombre de thématiques transparaissent au travers des commentaires et recommandations émis par le comité, qu'ils soient généraux ou plus spécifiques. Les réponses que nous décrivons ci-après reprennent l'ensemble des commentaires par grande thématique.

"L'unité devrait améliorer son rayonnement international, et porter des projets internationaux". Il est difficile de dire si notre rayonnement s'est amélioré car il n'y a pas de mesure objective d'un tel rayonnement, mais il faut constater que notre activité internationale est significative. Au cours de la période, nous avons contribué à 8 projets internationaux dont 4 financés par l'union européenne via les modalités ITN, H2020 et financements régionaux SUDOE, et 4 autres projets, l'un avec l'US Air Force, l'un avec l'IAEA, l'un avec un fond de recherche suisse, et l'un financé par le Belmont forum que nous portons. On notera encore une ANR internationale avec Taiwan et des expertises internationales au JRC-Ispra et à l'UNESCO. Nous contribuons aussi significativement aux grandes conférences internationales de notre domaine avec 31 contributions au cours de la période (comme conveners aux conférences EGU, AGU, Goldschmidt, comme membre de conseils scientifiques, comme organisateurs des conférences ou écoles d'été, dont 2 conférences de l'UNESCO tenues à Paris). Nous avons également reçu 27 chercheurs étrangers dans notre laboratoire et nous contribuons à des projets de formation à l'étranger (à Madagascar en particulier). Nous avons également une activité éditoriale importante avec 18 positions d'éditeurs associés dans les revues scientifiques internationales. Comme lors du précédent quinquennal, plus du quart de nos publications sont co-rédigées avec un collègue ne travaillant pas en France.

Bien que notre activité internationale soit tout à fait significative comme précisé ci-dessus, nous avons peu (quantitativement) de ressources financières provenant de l'international (en Europe et hors Europe) en comparaison des ressources d'origine régionale qui sont majoritaires (~50%). Nos activités à cette échelle, ainsi qu'à l'échelle nationale pour partie, nous donnent une très bonne visibilité, et nous permet d'exercer nos missions en forte interactions avec la société, ce qui revêt une très grande importance étant donné notre domaine d'activité et permet d'exercer nos activités dans la durée sur des territoires. Il est difficile d'être fortement présent sur tous les fronts.

"L'unité devrait développer une animation interne plus formalisée, notamment au niveau des départements, qui sont porteurs de pluridisciplinarité, plus de publications entre équipes et départements devraient pouvoir être produites." Force est de constater que l'essentiel de l'animation s'est faite au niveau des équipes qui constituent les départements. Chacune d'elle tient des réunions de travail régulières qui permettent à la fois l'organisation du travail et la réflexion sur les nouveaux projets à lancer. Étaient également prévus pour ce quinquennal 4 axes transversaux (terrains d'étude commun, trajectoires, méthodes numériques, et archéométrie) qui ont connu des succès variés. Si l'axe transversal terrains d'étude communs a bien fonctionné notamment avec le développement continu de travaux sur la carrière de Saint Martin le Noeud (et de nombreux travaux sur le site OZCAR de l'Orgeval sur lequel nous sommes très impliqués), les autres axes n'ont pas bien fonctionné. Sur les thématiques archéométrie et trajectoires, l'unité a continué à développer des activités très importantes dans le cadre de différents projets mais il n'y a pas eu d'animation lisible, mis à part des séminaires (sur le thème trajectoire : une ANR éponyme, plusieurs projets régionaux et nationaux, des expertises commandées par le JRC (Billen et al., 2021 ; 2022 ; Garnier et al., 2023 ; Grizzetti et al., 2023) ; sur le thème archéométrie : des projets et des publications et un conventionnement avec l'INRAP. Le thème méthodes numériques a été fortement perturbé par le non-recrutement d'un IR attendu sur le sujet et sur lequel nous comptions pour l'animation. Avec le recul, nous pensons que notre ambition était trop forte en termes de structuration de l'animation, 2 départements constitués de 5 équipes et 4 thématiques transverses font 11 sujets à porter au niveau de l'unité, alors que les chercheurs et enseignants-chercheurs sont déjà captés par leurs activités de recherche et d'enseignement, qu'ils mènent souvent en collaboration au sein de leurs équipes.

L'animation interne a également été renforcée par une augmentation du budget annuel alloué à notre appel d'offre interne dont les priorités sont le soutien aux jeunes chercheurs et les projets collaboratifs, inter-équipes ou inter-départements. Deux recrutements récents de MCF ont été axés sur des thématiques croisées "hydrologie et géophysique" et "contaminants et matière organique". Par ailleurs une jeune équipe résolument pluridisciplinaire (Geoprocess) a été constituée grâce à un financement de la ville de Paris, elle a

été le ferment de la constitution d'une nouvelle équipe pour le futur quinquennal. Notre projet pour le futur prévoit la suppression des départements et la création de 5 équipes dont 4 sont clairement pluridisciplinaires.

La pluridisciplinarité peut être envisagée de différentes façons, en ce qui concerne les thématiques de METIS, entre disciplines liées aux sciences de la nature et sciences humaines et sociales, et avec les acteurs de la société. Elle ne peut pas être mesurée seulement à l'aune des publications entre départements (10 dont 7 ACL), même si accroître leur nombre peut être un objectif séduisant, elle se mesure aussi aux publications pluridisciplinaires avec d'autres unités. On notera également plusieurs financements de la mission interdisciplinaire du CNRS et le financement d'une bourse de thèse "interfaces pour le vivant" par SU.

"L'unité devrait mettre en place d'une gestion prévisionnelle des emplois et des compétences en concertation avec les tutelles de l'unité, et mettre en avant les pistes pour satisfaire les besoins de nouveaux emplois". Nous avons depuis longtemps une liste prévisionnelle constituée et réfléchi sur le long terme, que le conseil de laboratoire rediscute et réajuste chaque année à la marge en fonction des événements récents (mutations, évolutions pédagogiques et scientifiques). Cette liste est présentée chaque année à nos tutelles, globalement et pour la partie qui les concerne. En retour, les échelles de temps sont souvent très longues, même pour des fonctions supports critiques comme celle d'administrateur de notre système d'information (poste non renouvelé par le CNRS depuis 2019), et peuvent être plus rapides par la mise en place de CDD suivis par des remplacements par des permanents (en gestion notamment). L'unité recrute également de nombreux CDD sur projets. Mais de nombreux postes n'ont pas été remplacés.

Plusieurs recrutements (3) ont cependant été rendus possibles dans la période récente par la mutualisation des fonctions. Le recul sur cette pratique n'est pas encore très grand puisque 2 d'entre eux sont extrêmement récents. Par le passé, nous avons pu observer un échec de cette stratégie en raison d'une trop grande dispersion de l'agent affecté dans 3 laboratoires différents. A la différence de l'échec précédent, ces nouveaux postes mutualisés sont aussi porteurs du projet mutualisé, et peuvent donc contribuer à déplacer les murs et restructurer les capacités et les services disponibles au sein des unités. Le processus de renouvellement est très long et insuffisamment lisible.

Notre commission d'évaluation soulignait aussi la nécessité de mener en parallèle une réflexion sur la mutualisation des ressources entre groupes de recherche et/ou au niveau de l'unité pour pouvoir financer le cas échéant des postes techniques. L'unité, avec ses équipes techniques, s'est engagée dans une réflexion collective en vue d'une nouvelle organisation de ses pôles techniques pour faciliter les interactions entre les personnels techniques et l'organisation du travail. Très souhaitable en soi, cette réflexion est rendue indispensable par la future organisation de l'UMR ou la bijection entre pôles techniques et équipe de recherche sera moins forte.

"Un nombre significatif de MCF pourrait passer leur HDR pour équilibrer les capacités d'encadrement des doctorants." 8 HDR ont été soutenues au cours de la période portant le pourcentage de chercheurs et enseignants-chercheurs titulaires d'une HDR à plus de 50%. 3 autres sont en préparation.

"Le prochain quinquennat devra aussi porter une attention particulière au futur des thématiques portant sur la microbiologie environnementale et la géochimie des contaminants dont la situation peut devenir critique, notamment suite aux départs en retraite de chercheurs et enseignants-chercheurs." L'EPHE a soutenu l'équipe de chimie des contaminants par le recrutement d'un MCF suite au départ à la retraite d'un directeur d'études et une MCF et le recrutement d'une technicienne pour remplacer le départ à la retraite d'une technicienne et une adjointe technique. En ce qui concerne la microbiologie environnementale, l'association avec l'équipe de l'UMR M2C a permis de continuer à développer des projets pluridisciplinaires (microbiologie-chimie) alors que la petite équipe de microbiologie (réduite à 1 MCF) a continué ses activités également avec des interactions entre microbiologie et chimie. Par ailleurs, nous avons largement contribué au projet Obepine en épidémiologie des eaux usées, qui permet aujourd'hui d'envisager un rapprochement avec l'équipe de microbiologie d'Eau de Paris pour le futur. Il reste difficile de recruter des EC ou chercheur spécialisés dans ce domaine de même que des ingénieurs et techniciens, l'UMR n'ayant pas encore la taille critique sur le sujet.

De manière plus générale, concernant le problème que pourrait poser le départ en retraite de plusieurs cadres, il est clair aujourd'hui que de plus jeunes chercheurs ont repris la main avec des contributions à plusieurs ANR et des projets PEPR actuellement en deuxième phase d'évaluation, et que ces chercheurs ont su se mobiliser pour proposer un nouveau projet pour l'unité.

"Publications en premier auteur par les doctorants"

Au cours de la période de référence, 66 doctorants ont été inscrits à Metis dont 44 thèses soutenues. Le bilan fait état en BIOGEO de 38 publications signées par les doctorants en 1er auteur sur 208 (ACL uniquement), et de 54 publications ACL sur 203 en H2GS2. La plupart des écoles doctorales, dont l'école doctorale GRNE où sont inscrits la plupart de nos doctorants, exigent une publication acceptée dans une revue de rang A au moment de la soutenance. Seules 3 thèses ont été soutenues sans respecter ce critère, mais avec une présentation de leurs résultats en conférences. Les doctorants concernés ont été recrutés au niveau ingénieur pendant ou immédiatement après leur thèse.

2- INTRODUCTION DU PORTFOLIO

Nous proposons 14 éléments de portfolio : 5 pour chacun des deux départements qui illustrent des points forts de leur activité, complétés par 4 éléments à l'échelle de l'unité, qui mettent en avant des activités transversales, en recherche, en formation, et sur notre organisation collective via la réalisation de notre premier BGES.

Éléments METIS

PF1. The Seine River Basin est un ouvrage synthétisant les travaux du PIREN Seine depuis le précédent ouvrage La Seine en son bassin, paru en 1998. Il offre une description interdisciplinaire du socio-écosystème du bassin de la Seine avec un fort accent sur la reconstruction des trajectoires long terme. Au-delà de la co-édition de l'ouvrage, 12 des 15 chapitres sont co-écrits par des membres de l'unité, dont 5 en 1er auteur. Les travaux sont réalisés et co-écrits avec les acteurs du territoire, montrant l'interaction forte des travaux de METIS avec la société.

Nicolas Flipo, Pierre Labadie, and Laurence Lestel (eds.), The Seine River Basin, Hdb Env Chem, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-54260-3>

PF2. La carrière souterraine dans la craie de Saint-Martin-le-Nœud, observatoire du SNO Karst dont D. Valdés est responsable, est suivi depuis 2012 par METIS. C'est un des chantiers partagés du laboratoire, avec une dizaine de chercheurs impliqués en hydrogéologie, biogéochimie et géophysique, le précieux soutien des équipes techniques de terrain et de laboratoire ainsi que 2 thèses et 7 stages de Master. Ce papier présente une synthèse de l'ensemble de ces travaux sur les processus de transfert et de l'eau et des contaminants dans la Zone non Saturée de la Craie

Valdes D., Chen N., Dumont M., Marlin M., Blanchoud H., Guérin R., Guillemoteau J., Alliot F., Nespoulet R., Aubry E., Rouelle M., Fauchard C., Gombert P., Ribstein P. (2022). Transfer of Water and contaminants in the Chalk unsaturated zone – Underground quarry of Saint Martin le Nœud. Geological Society, London, Special Publications, 517 (1). <https://doi.org/10.1144/SP517-2020-231>

PF3. La nouvelle Mineure Métiers Ressource et Qualité de l'Eau dans l'Environnement a été ouverte à la rentrée 2022 avec 16 étudiants en L2. L'année de L3 se fait en alternance et par apprentissage pour former aux Métiers de l'Eau. Co-dirigée par G. Ona-Nguema (IMPMP) et Danièle Valdés (METIS), cette formation est principalement portée par METIS avec l'implication de 10 enseignants-chercheurs principalement dans les domaines de l'hydrologie, l'hydrogéologie, la biogéochimie, l'hydraulique, le traitement de l'eau, les SIG et la métrologie.

PF4. Le stage de M1 de Perrine Hoffmann, étudiante à l'ENSTA, a permis de réaliser un premier bilan GES de l'UMR METIS, pour l'année 2019 (pré-covid). En moyenne sur 100 personnes (y compris doctorants et post-doctorants), le bilan individuel s'établit à environ 6 tCO₂eq/pers, dont une majorité pour les achats (41%) et les missions (30%). La première décision de réduction, validée en AG fin 2022, est de ne plus utiliser l'avion pour les trajets faisables en train en moins de 5h.

Éléments du département H2GS2

PF5. L'ITN ENIGMA (European training Network for in situ imaging of dynamic processes in heterogeneous subsurface environments) a formé une nouvelle génération de jeunes chercheurs au développement de méthodes innovantes d'imagerie et de modélisation de la dynamique des processus dans les hydrosystèmes de subsurface (avec le souci de transférer ces innovations au secteur économique). ENIGMA a rassemblé 21 partenaires (15 universitaires et 6 industriels) de 8 pays européens. L'UMR METIS a participé très activement à l'animation de cet ITN avec un *deputy coordinator* (D. Jougnot) et un porteur de sujet de thèse (L. Bodet) réalisée par L. Blazevic.

Hermans, T., Goderniaux, P., Jougnot, D., Fleckenstein, J., Brunner, P., Nguyen, F., Linde, N., Huisman, J. A., Bour, O., Lopez Alvis, J., Hoffmann, R., Palacios, A., Cooke, A.-K., Pardo-Álvarez, Á., Blazevic, L., Pouladi, B., Haruzi, P., Kenschlikova, M., Davy, P., Le Borgne, T. (2023) Advancing measurements and representations of subsurface heterogeneity and dynamic processes: towards 4D hydrogeology, Hydrology and Earth System Sciences, 27, 255–287, [doi:10.5194/hess-2022-95](https://doi.org/10.5194/hess-2022-95).

PF6. Cette coopération, très technique du point de vue géophysique mais publiée dans une revue de référence en hydrogéologie, a permis de suivre la dynamique spatiale et temporelle d'une nappe et de proposer une modélisation 2D entièrement intégrée du corridor fluvial, grâce à un véritable travail d'articulation d'approches géophysiques et hydrogéologiques. La méthodologie qui en résulte, permettant d'améliorer considérablement la compréhension des flux impliqués, correspond à la concrétisation commune des objectifs du WP6.1 de l'Equipex CRITEX et de l'axe 2-phase VII du PIREN-SEINE et offre des opportunités aux WP2 et WP3 de l'IR OZCAR.

Dangeard, M., Rivière, A., Bodet, L., Schneider, S., Guérin, R., Jougnot, D., Mainault, A. (2021) Expanded stream-aquifer interface model constrained by time-lapse seismic, Water Resources Research, 57(10), e2020WR028911, doi:10.1029/2020WR028911.

PF7. Cet article est le fruit d'une collaboration multi-UMR (METIS, GM, ITES) et multi-institutions (SU, CNRS, INRAe) rendue possible par le thème transverse "Contribution de la gravimétrie supraconducteur à l'estimation de l'évapotranspiration" porté par Simon Carrière (METIS) et financé par l'IR OZCAR. Il s'agit d'une première mondiale en hydrogéophysique qui illustre bien les liens entre géophysique et hydrologie au sein du département H2G2S, à savoir l'estimation de l'évapotranspiration à l'échelle du site du LSBB (SNO H+) au pas de temps journalier.

Carrière, S. D., Loiseau, B., Champollion, C., Ollivier, C., Martin-StPaul, N. K., Lesparre, N., Olioso, A., Hinderer, J., Jougnot, D. (2021). First evidence of correlation between Evapotranspiration and Gravity at a daily time scale from two vertically spaced superconducting gravimeters, Geophysical Research Letters, 48(24), e2021GL096579, doi:10.1029/2021GL096579.

PF8. Cet article de 2020, déjà cité 85 fois selon WoS, illustre les travaux menés en modélisation globale pour comprendre les liens entre ressources en eau souterraines et changement climatique. Ils résultent d'une collaboration fructueuse avec la National Taiwan University, qui a donné lieu à 5 articles depuis 2018, deux projets internationaux (IGEM et BLUEGEM), et récompensée en 2021 par le Grand Prix Franco-Taiwanais.

Wu WY, Lo MH, Wada Y, Famiglietti JS, Reager JT, Yeh PJF, Ducharme A, Yang ZL, 2020. Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. Nature Communications, 11, 3710. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17581-y>

PF9. La conférence « Les eaux souterraines, clé des Objectifs de Développement Durable » s'est tenue à Sorbonne Université en mai 2022. Avec 520 participants de 58 pays, dont 40% de femmes, elle a rassemblé des spécialistes des eaux souterraines mais aussi des gestionnaires de services d'eau publics et privés, des décideurs, des financeurs, des industriels, des ONG et des représentants de la société civile. Valérie Plagnes a co-présidé le Conseil Scientifique et participé à l'organisation et 6 autres Métisziens ont modéré une session ou présenté leurs travaux. <https://www.qw-sdg2022.fr/index.php/fr/>

Éléments du département BIOGEO

PF10. La modélisation des transferts des nutriments et du carbone dans les grands bassins versant est un point fort historique de METIS. La récente prise en compte des hydrosystèmes comme une composante active des bilans de carbones globaux a mis en évidence l'impact potentiel des barrages-réservoirs sur les émissions de gaz à effet de serre (dont le CO₂). Ces réacteurs complexes intègrent une variété de processus biogéochimiques et hydrologiques étroitement liés et l'apport d'une modélisation mécaniste se révèle extrêmement précieux pour comprendre et quantifier le fonctionnement de ces réacteurs.

X. Yan, J. Garnier, G. Billen, S. Wang, V. Thieu (2022). Unravelling nutrient fate and CO2 concentrations in the reservoirs of the Seine Basin using a modelling approach. Water Research, 225 : 119135.

PF11. L'étude des archives sédimentaires est un instrument appliqué depuis longtemps, à METIS en particulier, pour la reconstitution historique des contaminations environnementales. Son application à des molécules plutôt hydrophiles comme des produits pharmaceutiques dont l'usage a massivement augmenté depuis les années 1950 est plus récente. Ces travaux se poursuivent aujourd'hui par la mise en lumière des liens entre certaines teneurs très élevées en antibiotiques et la présence de marqueurs génomiques d'antibiorésistance. Cette prochaine étape permettra de comprendre de manière élargie les conséquences de la contamination chimique dans les environnements sédimentaires.

Thiebault T., F. Alliot, T. Berthe, H. Blanchoud, F. Petit, E. Guigon (2021). Record of trace organic contaminants in a river sediment core: From historical wastewater management to historical use. STOTEN, 773, 145694.

PF12. Cet article est le fruit des recherches novatrices menées depuis plusieurs années à METIS à l'interface entre géochimie organique, microbiologie environnementale et paléoclimatologie à travers des

collaborations internationales (Chili, Etats-Unis, Grande-Bretagne). Seuls deux laboratoires dans le monde incluant METIS travaillent actuellement sur les composés organiques objets de cet article et proposés comme nouveaux marqueurs des conditions de température et pH en milieu terrestre.

Véquaud P., Derenne S., Thibault A., Anquetil C., Bonanomi G., Collin S., Contreras S., Nottingham A., Sabatier P., Salinas N., Scott W., Werne J., Huguet A. (2021). Development of global temperature and pH calibrations based on bacterial 3-hydroxy fatty acids in soils. *Biogeosciences*, 18, 3937-3959. <https://doi.org/10.5194/bg-18-3937-2021>

PF13. Les isotopes stables, et en particulier celui du carbone, sont des outils régulièrement employés au laboratoire METIS pour suivre la transformation de la matière organique dans le milieu, que ce soit à l'échelle du sol ou de composés moléculaires. Son application a permis de mettre en évidence le rôle des vers de terre dans la dynamique de la matière organique apportée au sol, au travers de la formation d'interactions organo-minérales.

Vidal A., Quenea K., Alexis M., Nguyen Tu T.T., Mathieu J., Vaury V., Derenne S. (2017). Fate of ¹³C labelled root and shoot residues in soil and anecic earthworm casts: A mesocosm experiment. *Geoderma*, 285, 2017, 9-18.

PF14. Certains parasites intestinaux, les acanthocéphales, présentent la remarquable capacité d'accumuler des polluants depuis leur hôte. Dans cette étude expérimentale, nous avons testé si la réponse des chevesnes, des poissons d'eau douce, à des niveaux environnementaux en polluants organiques était modulée par la charge parasitaire. Nos résultats suggèrent un bénéfice à être parasités dans les milieux contaminés. Ce travail illustre le développement de nos recherches en écotoxicologie, qui sera notamment poursuivi dans le cadre de l'ANR HELP.

Molbert N., Agostini S., Alliot F., Angelier F., Biard C., Decencière, Leroux-Coyau M., Millot A., Ribout C., Goutte A. (2021). Parasitism reduces oxidative stress of fish host experimentally exposed to PAHs. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 219, 112322

3- AUTOÉVALUATION DU BILAN

3-1 Autoévaluation de l'unité

Domaine U1. Profil, ressources et organisation de l'unité

Référence U1.1. L'unité s'est assigné des objectifs scientifiques pertinents.

L'UMR METIS est à la croisée de plusieurs programmes scientifiques et structures de grande envergure. Il s'agit du programme PIREN-Seine, fondé au sein de l'unité il y a 30 ans et dans lequel elle a toujours une forte implication (gestion du programme, co-direction de chacun des WP constituant le programme). Le PIREN-Seine est partie prenante de la Zone Atelier Seine (dirigée également par une chercheuse du laboratoire) et du réseau européen e-LTER. L'unité est également très impliquée dans le réseau OZCAR, l'autre versant français du réseau européen e-LTER. Elle y porte notamment des responsabilités dans le développement de la géophysique ainsi que dans le programme PIA4 Terraforma. A ce titre, elle a bénéficié d'un nouveau poste d'IR mutualisé. L'UMR est également partie prenante de la fédération IPSL à laquelle elle contribue au premier chef comme membre du groupe Orchidée qui développe le modèle du même nom avec un tropisme particulier pour les flux latéraux (hydrologie de surface, eaux souterraines), et également sur le devenir du carbone dans les sols.

L'UMR METIS entretient également des relations étroites avec de nombreux acteurs de la gestion de l'eau et des territoires (SIAAP, Eau de Paris, AESN, conseil de l'estuaire de la Seine, GIP Seine-Aval, mission inter-estuaire de l'OFB, comité Ecophyto...). Notre positionnement scientifique axé sur l'analyse prospective et rétrospective de l'évolution des territoires et de la gestion de l'eau est donc bien situé à l'interface entre notre réseau de collaborations et le réseau des acteurs avec lequel nous interagissons. Nous le déclinons depuis la prospective à grande échelle jusqu'à la compréhension de processus essentiels à plus petite échelle.

L'UMR dispose également d'une forte reconnaissance pour des compétences techniques particulières dans le domaine de la géophysique de proche surface et de l'analyse des composés organiques (matière organique et contaminants organiques). Nous avons donc à coeur de maintenir ces compétences qui sont en interaction avec les grandes orientations déclinées ci-dessus, qui nourrissent des projets spécifiques au sein d'autres communautés (réseau GEOSCAN et collaborations industrielles de longue date pour la géophysique, réseau géochimie organique du RÉGEF).

Référence U1.2. L'unité dispose de ressources adaptées à son profil d'activités et à son environnement de recherche et les mobilise.

L'unité dispose d'un budget moyen annuel d'environ 2000 k€ dont 170 k€ proviennent des dotations récurrentes de ses tutelles. Dans l'établissement du bilan financier, tous les budgets des projets pluriannuels ont été lissés sur la durée des projets et répartis sur les différentes années au prorata de la durée des projets, afin de donner une image non pas des notifications mais du budget effectivement disponible chaque année.

Le budget sur ressources propres est en nette augmentation au cours de la deuxième partie du quinquennal ce qui est dû à deux projets importants dont il est nécessaire ici de dire quelques mots. Le budget du programme PIREN-Seine a été en nette augmentation au cours de sa dernière phase (à partir de 2020) en raison de l'arrivée de nouveaux partenaires et de l'intégration au budget de la communication du programme dans son budget général. Si METIS est l'unité gestionnaire de ce budget, qui s'intègre donc à son bilan financier, une très forte partie du budget est redistribuée aux différentes équipes extérieures à l'unité qui contribuent au programme. La part allouée aux chercheurs de METIS est utilisée par les deux départements, elle permet également le financement de 4 ingénieurs affectés à des développements utiles à tout le programme. Ce budget constitue la quasi-totalité des ressources propres d'origine régionale qui constituent l'enveloppe "ressources communes" (tableau ressources financières). Un autre projet important a été le projet Obepine (épidémiologie des eaux usées, suivi du SARS-CoV2) au sein duquel METIS a été en responsabilité de la logistique du suivi des 200 stations d'épuration suivies, ce qui s'est traduit par un budget important d'origine

nationale (ministères de la recherche et de la santé) affecté au département BIOGEO, et destiné au financement des analyses par différents laboratoires sous-traitants.

Les ressources propres sont difficilement mutualisables car beaucoup des contrats publics notamment doivent être précisément justifiés alors que les frais "de laboratoire" ne sont pas acceptés, ou sont très faibles. Le conseil de laboratoire a voté la possibilité que soient prélevés 10% des montants des contrats hors partie réservée aux salaires, mais nous utilisons fort peu cette disposition qui créerait une dissymétrie entre les deux départements, le département H2GS2 seul ayant beaucoup de contrats industriels qui permettent un prélèvement par le laboratoire.

Les ressources mutualisées sont donc principalement les dotations des tutelles auxquelles s'ajoutent des queues de contrats. Elles sont utilisées pour des achats de moyens équipements destinés à nos pôles techniques, ou comme complément à des achats plus gros d'équipements pour lesquels d'autres ressources sont mobilisées (ressources contractuelles, soutiens régionaux...) et pour l'appel d'offre interne et le soutien aux jeunes chercheurs. Pour ces dépenses le conseil de laboratoire est explicitement consulté. Elles sont utilisées également pour soutenir le fonctionnement courant des pôles techniques, la jouvence de notre parc informatique, et pour d'autres dépenses de fonctionnement de l'unité (téléphonie, copieurs, dépenses pour l'hygiène et la sécurité, entretien des véhicules de service).

Nous ne sommes pas en mesure d'avoir une politique concernant nos locaux qui sont entièrement gérés par Sorbonne Université, nous prenons en charge certains équipements de leurs équipements (climatisation typiquement).

Un point très critique concerne nos ressources humaines. Ainsi 10 techniciens titulaires (5 CNRS, 3 SU, 2 EPHE) ont quitté l'unité au cours de la période 2017-2022, dont 4 mutations et 6 départs en retraite. En contrepartie 3,5 recrutements d'ingénieurs et techniciens ont pu avoir lieu (1,5 SU, 1 CNRS, 1 EPHE), mais sauf dans un cas il s'agit de postes mutualisés. Au cours de la même période, on dénombre 5 départs d'enseignants-chercheurs (3 retraites, 2 mutations, 3 SU et 2 EPHE) et 3 arrivées (2 SU et 1 EPHE), 3 départs de chercheurs (2 retraites et une mutation) et 1 arrivée. Au bilan, nous comptabilisons 15 départs et 7.5 arrivées, en comptant pour 2 arrivées les 2 ITA installés dans nos locaux mais qui ont des missions mutualisées avec d'autres entités. Nos effectifs se montent aujourd'hui à 44.5 permanents et 50 CDD, associés et bénévoles, y compris les doctorants. Notre précédent rapport à l'HCERES mentionnait 52 permanents et 39 CDD, associés et bénévoles. Les effectifs se sont inversés, jusqu'où ira la précarisation de la recherche ?

Référence U1.3. Les pratiques de l'unité sont conformes aux règles et aux directives définies par ses tutelles en matière de gestion des ressources humaines, de sécurité, d'environnement, de protocoles éthiques et de protection des données ainsi que du patrimoine scientifique.

L'unité favorise la formation de l'ensemble de ses agents. Elle finance toutes les demandes (raisonnables) lorsqu'elles ne peuvent pas être financées dans le cadre des plans formations des tutelles. Nombre de formations concernent comme il se doit la sécurité au travail (secourisme, incendie, sécurité en conditions isolées, formation des AP, formation à la radioprotection). Pour les techniciens et ingénieurs, les formations sont discutées au sein des pôles et des équipes et sont proposées par les agents eux-mêmes. Pour les enseignants-chercheurs et chercheurs, les CRCT et demandes de délégations sont systématiquement soutenues.

L'unité n'a pas spécifiquement de politique en matière de lutte contre les discriminations, de genre en particulier, mais nous ne constatons pas de problème notable de parité : le pourcentage de femmes dans les différentes classes de l'effectif sont de 50% pour les PR/DR, de 43% pour des MCF/CR, et de 46% pour les ingénieurs et techniciens (y compris les CDD).

En termes de sécurité au travail, nos AP sont très attentifs à leurs responsabilités et veillent à l'identification des risques et leur résorption aussi rapidement que possible. Tous les nouveaux arrivants reçoivent une formation à la sécurité. La collaboration est ouverte avec les services de santé des tutelles, et les recommandations sont rapidement mises en œuvre en cas de signalement d'un incident ou d'un risque. L'unité déploie un budget de 15 à 20 k€ par an pour des dépenses d'hygiène et sécurité (déploiement et entretien des climatisations, entretien des hottes et des dispositifs de stockage des produits, entretien de matériels spécifiques tels que centrifugeuses ou autoclaves...). Quelques agents particulièrement fragiles font l'objet d'un suivi spécifique. Plusieurs cadres ont suivi des formations aux risques psycho-sociaux.

Par ailleurs, un groupe de travail a été constitué pour chercher à limiter les émissions de CO2 et l'empreinte environnementale de l'unité, en lien avec le groupe Climactions de l'IPSL et le GDR Labos1.5. Ce groupe a encadré la réalisation du BGES de METIS pour l'année 2019 (PF4), et de premières mesures de limitation des émissions ont été mises en œuvre. Un travail est en cours pour limiter l'utilisation de matériel de laboratoire jetable en plastique.

Le patrimoine biologique de l'UMR consiste essentiellement en souches bactériennes isolées de l'environnement (sols des Alpes françaises), en souches fongiques obtenues auprès des banques dédiées et en souches bactériennes génétiquement modifiées construites au laboratoire, nécessaires aux approches de biologie moléculaire. Ces microorganismes sont de classe 1 d'après leur identification taxonomique. Pour leur manipulation et leur stockage, le laboratoire de microbiologie dispose d'un poste de sécurité microbiologique, d'un autoclave nécessaire à la stérilisation ainsi que d'un congélateur à -80°C qui sera doublé en 2023 de manière à répartir les stocks et à permettre la bancarisation des échantillons projets (en particulier des futures équipes TRACES et DYNAMO). Plusieurs personnes au sein de l'UMR ont été formées à la manipulation de l'autoclave. Dans le cadre des approches par biologie moléculaire une déclaration des organismes génétiquement modifiés construits a été faite auprès du Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation en 2020. La gestion des déchets suit les procédures recommandées par le service H&S de Sorbonne Université.

Notre système informatique est intégré au sein de celui de Sorbonne Université et bénéficie donc des sécurités qui existent à ce niveau. Tous nos serveurs sont protégés et ne sont accessibles depuis l'extérieur que via un VPN. Nous avons déplacé une grande partie de nos serveurs web auprès d'hébergeurs pour limiter les accès ouverts sur nos serveurs, mais cette politique est encore en déploiement du fait de la vacance de notre poste d'ASR durant 3 ans. Tous les postes de travail de l'unité sont équipés de systèmes anti-virus à jour, les portables extérieurs (chercheurs invités notamment) ne sont autorisés à se connecter qu'après vérification de la mise à jour des antivirus. Depuis 2018 tous les nouveaux postes de travail ont des disques chiffrés et sont accompagnés d'un système de sauvegarde individuel, et les personnels invités à l'utiliser. Notre correspondant PSSI relaie régulièrement les alertes et recommandations qui nous concernent.

Synthèse de l'autoévaluation

Forces : L'UMR METIS cible ses activités sur la compréhension du fonctionnement des territoires, circulation de l'eau, des éléments, des composés en intégrant l'étude des interactions territoire-société. Elle traite de ces questions à plusieurs échelles en s'impliquant dans l'observation y compris le développement de techniques d'observation et la modélisation. Il s'agit d'un domaine vaste, au sein duquel l'UMR ne fonctionne pas de manière isolée, mais possède des spécificités remarquables (modélisation hydrogéologique d'échelle globale, modélisation régionale de la circulation des nutriments, développements de techniques couplées en géophysique de proche surface, caractérisation des matières organique) tout en travaillant au sein d'un fort réseau national (IPSL, Zones-Ateliers, OZCAR).

Faiblesses : Elle est moins présente au niveau européen et international malgré des activités significatives (contribution à 2 ITN, à un projet H2020, pilotage d'un projet Belmont forum). Elle développe également ses compétences dans de nouvelles directions (couplage santé-environnement). Son principal point de faiblesse est l'érosion de ses ressources humaines en CDI au profit de ressources humaines en CDD, ce qui rend le développement de ses activités et la réalisation des fonctions de base (gestion, informatique) de plus en plus fragiles.

Domaine U2. Attractivité

Référence U2.1. L'unité est attractive par son rayonnement scientifique et s'insère dans l'espace européen de la recherche.

L'UMR METIS fait preuve d'un excellent rayonnement scientifique, tant au niveau national qu'international, comme attesté par nos prix (5, des doctorants aux émérites), appartenance à des académies (6), implication dans des sociétés savantes (20), et responsabilités éditoriales (22) et un nombre croissant de post-docs y compris étrangers à mettre en relation avec la précarisation croissante de la recherche. Les séjours à

l'étranger (9), conférences invitées (21), invitation de collègues étrangers (30), et organisations de manifestations scientifiques internationales (19, dont la conférence "Groundwater, keys to the sustainable development goals", IAH/UNESCO, **PF9**), ont évidemment été réduits par la pandémie de covid.

Comme indiqué dans nos données de caractérisation (onglet 5), l'ensemble de ces indicateurs est bien équilibré entre nos deux départements BIOGEO et H2GS2 (cf. analyse par département dans les références H2.1 et B.2.1), tout comme les participations à des comités scientifiques (20) et instances d'évaluation (28) et d'expertise (9), qui constituent une part importante de notre rayonnement et de notre influence au niveau national.

Il faut enfin noter que nous n'avons pas bénéficié de délégation à l'IUF malgré la part importante des enseignants-chercheurs dans notre effectif. Les incitations par la direction du laboratoire seront poursuivies, notamment en aidant à identifier les membres de l'IUF pouvant parrainer nos candidat.e.s.

Référence U2.2. L'unité est attractive par la qualité de sa politique d'accompagnement des personnels.

Suite aux politiques de non renouvellement des sortants par nos tutelles, la période 2017-2022 a vu l'érosion de nos effectifs permanents mais nous continuons d'accueillir de très nombreux stagiaires et doctorants, post-doctorants et personnels contractuels. Nous accueillons aussi des chercheurs invités (30 invités étrangers sur la période), du niveau doctoral à senior, avec mise en place d'une convention d'accueil indiquant les moyens mis à disposition. Les moyens de base sont les mêmes quelles que soient les catégories de personnels et sont principalement mis à disposition par la tutelle hébergeante SU (bureaux, réseau internet, ressources documentaires, restauration collective). L'unité fournit un ordinateur et des moyens de sauvegarde à tous les personnels hébergés.

Un livret d'accueil résume notre organisation collective (règlement intérieur, moyens, gouvernance et conseils de l'unité) et renvoie à notre intranet pour les questions pratiques. Les nouveaux arrivants font systématiquement une visite des services communs pour se présenter et apprendre à connaître notre organisation. Ils signent une charte informatique, et doivent suivre une formation aux bonnes pratiques de laboratoire par les assistants de prévention avant de pouvoir accéder aux plateaux techniques. Ils sont présentés à l'ensemble du laboratoire lors des AGs d'unité (2 par an). La vie collective du laboratoire passe aussi par une journée scientifique annuelle, qui permet à tous les personnels (y compris techniques et non permanents) de présenter leur travail, et l'unité soutient diverses festivités sociales (galette des rois, sorties terrain collectives, etc.).

Outre les moyens alloués aux nouveaux chercheurs et EC permanents par nos tutelles, l'appel d'offre interne de METIS, qui alloue environ 20 kE par an à des petits projets collaboratifs (< 5kE), permet aux nouveaux entrants de démarrer des travaux avec leurs nouveaux collègues, de financer un stage de M2 s'ils le souhaitent, ou de compléter les dépenses de fonctionnement des doctorants ou post-doctorants. Ces travaux sont mis en avant lors des journées scientifiques de l'unité.

Les personnels d'appui à la recherche sont encouragés à la formation permanente (l'unité les finance chaque fois que c'est nécessaire, si le financement n'est pas assuré par les ressources RH des tutelles) et aux prises de responsabilité, en vue notamment d'augmenter leurs chances de promotions. En 2022, 3 PAR SU ont obtenu une promotion. Une réflexion a aussi été engagée depuis un an pour une "mutualisation renforcée" des plateaux techniques. Il s'agit d'associer le plus largement possible les scientifiques et techniciens utilisateurs de ces plateaux à la stratégie scientifique donc aux choix d'investissement, et de faciliter les transferts de compétence entre les différents personnels techniques et scientifique, pour améliorer les procédures (e.g. cahier de laboratoire), et mieux garantir la continuité du service. Ce travail est particulièrement nécessaire vu l'évolution de nos effectifs et la reconfiguration de nos équipes (cf. Trajectoire).

Référence U2.3. L'unité est attractive par la reconnaissance de ses succès à des appels à projets compétitifs.

Le tableau des ressources contractuelles compte environ 170 lignes qui sont autant de ressources actives au cours de la période, soit près de 30 nouvelles ressources sollicitées et obtenues par an, et plus de dépôts pas toujours fructueux bien entendu. Il n'y a pas de politique de l'unité qui imposerait une discussion collective

systematique des projets, les réflexions sur les projets à déposer sont menées au sein des équipes, et entre équipes, à leur rythme. L'équipe de direction est informée des dépôts, et peut le cas échéant suggérer des amendements. C'est à l'occasion des étapes structurantes d'évolution de l'unité qu'une réflexion plus collective est menée.

L'UMR METIS finance des CDD (thèse, post-doc, PAR) sur ses contrats de recherche, mais ne finance pas de CDD sur sa dotation. 3 CDD "longue durée" financés par le PIREN-Seine ont été recrutés à Sorbonne Université et sont hébergés à METIS, avec une procédure de titularisation en discussion pour l'un d'entre eux. Les équipements sont en priorité financés sur les contrats de recherche et/ou en réponse à des appels d'offres spécifiques (de la région notamment) et en demandant un soutien auprès de l'OSU. L'unité peut alors compléter les budgets sur sa dotation pour certains équipements.

Sur sa dotation, l'unité finance des équipements les plus fortement mutualisés (véhicules, matériel informatique).

L'UMR METIS est impliquée dans plusieurs projets PIA (CRITEX, TERRA FORMA, EUR-IPSL), où elle occupe des responsabilités dans certains WP. Elle bénéficie aussi de financements via l>IDEX de Sorbonne Université les programmes financés dans ses instituts (Institut de la Transition Environnementale en particulier). Ils ont permis notamment de financer un doctorat et deux post-doctorats, ainsi que différents projets.

Référence U2.4. L'unité est attractive par la qualité de ses équipements et de ses compétences techniques.

L'UMR METIS est bien équipée pour mener à bien les missions qu'elle s'est assignée. Ses équipements analytiques, permettent de soutenir des travaux dans le domaine des transferts de carbone et nutriments dans les bassins versants (carbone et nutriments sous forme dissoute, particulaire et gazeuse -GES-), la caractérisation de la matière organique (LC-MS, LC-MS-MS, py-LC-MS) et la mesure des contaminants organiques (LC-MS-MS, GC-MS-MS, LC-MS-QToF). L'UMR dispose également de l'expertise et les relations et compétences nécessaires pour travailler avec des laboratoires et plateformes proches pour des analyses qu'elle n'est pas en mesure de réaliser elle-même. L'UMR est également particulièrement compétente dans le domaine de la géophysique de proche-surface, où elle possède un parc conséquent et deux ingénieurs pour le développement, l'un des deux, très récemment recruté, ayant des responsabilités nationales au sein du programme OZCAR. Ses ingénieurs et techniciens sont parfaitement compétents pour tous ces équipements, mais l'érosion de leurs effectifs rend le travail beaucoup plus tendu notamment pour tous les travaux liés à la préparation des échantillons ou la maintenance/réparation de l'équipement de géophysique et de terrain.

Toute l'unité a souffert du départ non renouvelé de notre ASR en 2019. Nous fondons beaucoup d'espoirs dans le recrutement par SU d'un AI partagé avec un autre laboratoire pour remettre à flot puis maintenir notre système informatique.

Les chercheurs et enseignants-chercheurs de l'unité sont très compétents pour le développement des outils informatiques qui leur sont nécessaires (co-développement du modèle Orchidée, développement de l'ensemble py-Nuts RiverStrahler, simulations multiphasiques en milieu poreux, logiciels pour l'imagerie géophysique), mais l'absence depuis de nombreuses années des ressources humaines nécessaires pour soutenir le développement a été et continue d'être un frein considérable pour ces développements. Les chercheurs et enseignants-chercheurs de l'unité accèdent aux mésocentres de calcul de SU et de l'IPSL et aux calculateurs nationaux (GENCI).

Notre équipe de gestion a subi une érosion des effectifs au cours de ce contrat quinquennal. Elle est composée actuellement de 3 personnes, dont une seulement sur un poste permanent, qui porte donc une responsabilité excessive, et prendra sa retraite lors du prochain quinquennal. Il est absolument essentiel de prévoir son remplacement prochain, avec le soutien de nos tutelles, et de stabiliser les deux personnes actuellement en CDD.

Synthèse de l'autoévaluation

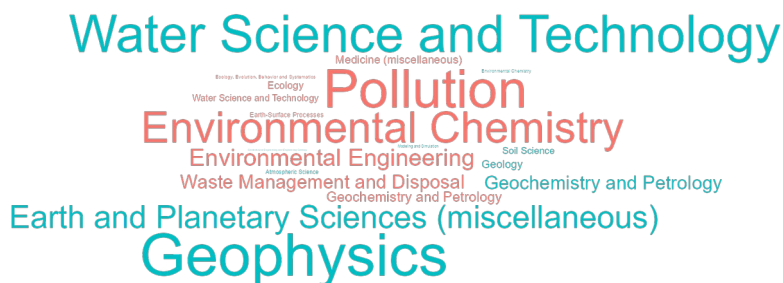
Forces : L'UMR maintient et renouvelle un parc technique pertinent dans le domaine de la chimie environnementale (contaminants organiques, caractérisation de la matière organique), dans le domaine de la géophysique de proche surface et pour les observations de terrain (systèmes de mesures et d'échantillonnage, contribution à des observatoires). Ses agents ont une compétence reconnue dans le développement des activités associées. L'UMR est très impliquée dans des projets régionaux et nationaux importants qui lui confèrent une très bonne visibilité et lui permettent de développer ses activités dans la durée. Son leadership dans des projets européens est moindre. Nombre de ses membres sont fortement impliqués dans la communauté internationale (édition, animation de colloques).

Faiblesses : La diminution des effectifs permanents, alors que l'activité contractuelle permet d'augmenter le nombre d'agents en CDD, fragilise l'ensemble des points forts précités. Les services support (gestion et informatique) sont particulièrement sensibles à ces problèmes d'effectifs.

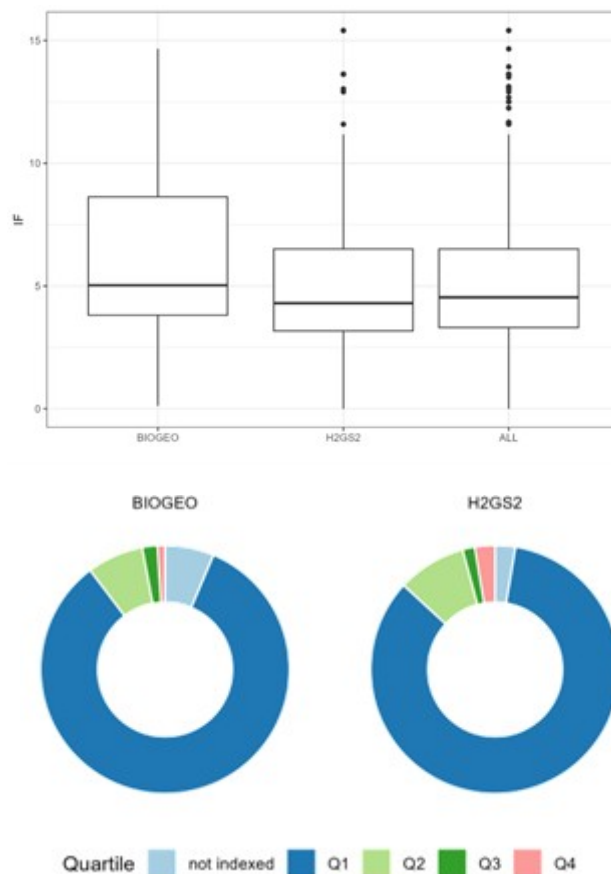
Domaine U3. Production scientifique

Référence U3.1. La production scientifique de l'unité satisfait à des critères de qualité.

L'analyse du champ "research area" des journaux dans lesquels nous publions illustre bien les différences de champs disciplinaires entre les deux départements (H2GS2 en bleu et BIOGEO en rose dans le nuage de points ci-dessous), en cohérence avec nos thématiques de recherches, qui relèvent plus de l'Environnement pour BIOGEO et des Sciences de la Terre pour H2GS2. Ces différences ne doivent pas masquer de forts recouvrements liés à place centrale de l'eau et de la compréhension des processus dans les deux départements, autour des notions très partagées d'hydrosystèmes continentaux et de zone critique, et de l'étude de leurs évolutions sous l'influence des pressions anthropiques, passées et futures. Les éléments de notre portfolio illustrent les différences de méthodes propres aux deux départements pour mener ces travaux, avec des développements très innovants dans tous les cas (en modélisation, instrumentation, développements analytiques, et par combinaison de méthodes).



Les journaux dans lesquels nous publions sont des journaux bien cités, pour 75% avec des facteurs d'impact supérieurs à 3 environ (à gauche ci-dessous). Les facteurs d'impacts sont un peu plus élevés dans le département BIOGEO, qui publie dans des journaux plus généralistes en l'environnement, alors que les bons journaux en hydrologie et géophysique s'appuient sur une communauté un peu plus petite. A titre d'exemple, les principaux journaux de lettres sont ERL (IF=7) et GRL (IF= 5.5) pour les départements BIOGEO et H2GS2. En revanche, quel que soit le département, nos articles ACL sont en très grande majorité publiés dans des revues du premier quartile de nos domaines de recherche (à droite ci-dessous). Sur la période, nous comptons aussi 12 articles dans les grandes revues "généralistes" (Nature Group et PNAS; 6 dans chaque département).



La qualité et le rayonnement de nos travaux se retrouvent aussi dans les conférences auxquelles nous avons participé (493 au total pour l'unité en France et à l'étranger, dont 35 conférences invitées). Les conférences les plus fréquentées par METIS sont les grandes conférences internationales pluridisciplinaires, avec 21 Goldschmidt et 20 EGU pour BIOGEO, et 76 EGU et 31 AGU pour H2GS2.

Référence U3.2. La production scientifique de l'unité est proportionnée à son potentiel de recherche et correctement répartie entre ses personnels.

Les personnels chercheurs de METIS publient principalement sous forme d'articles à comité de lecture (459 ACL selon HAL, soit environ 75 par an, dont 86% en « open access »). Ramené au nombre d'ETP-chercheur le 31/12/2022 (18 ETP-ch, en comptant les enseignants-chercheurs pour 50%), le ratio est de 4.2 publications par ETP-ch et par an. Notre annexe bibliographique (Annexe 1) fait état de 406 articles de rangs A, auxquels s'ajoutent 48 chapitres ou directions d'ouvrages, et 123 rapports et d'articles dans des revues professionnelles. Notre production est aussi largement diffusée sous forme de communications lors de conférences nationales ou internationales (493, dont 35 invitées). METIS dispose également d'un compte Twitter qui permet de relayer les articles, conférences mais aussi les actions de médiation vers le grand public que plusieurs personnels chercheurs de METIS réalisent.

La production des connaissances est équilibrée entre les deux départements, dont les ETP-chercheur sont identiques (9 et 9). Les articles ACL et les communications en conférences sont bien répartis entre les deux départements : 52% BIOGEO - 48% H2GS2. Des différences s'observent pour les autres éléments, liés aux domaines de recherche et aux sources de financement. Il y a davantage de directions d'ouvrages/chapitres d'ouvrages dans BIOGEO que dans H2GS2 (79% - 21%) mais la tendance est inverse pour les rapports et autres articles en revues professionnelles (22% - 78%).

Les chercheurs débutants de METIS (thèse en 2009 et ultérieures, soit 24% des personnels chercheurs) ont publié 34 % des ACL, dont 25% sont en 1^{er} auteur, soit 8,6% des ACL de METIS. Les publications des doctorants et post-doctorants représentent respectivement 24 % et 14% des ACL dont près de la moitié sont en 1^{er} auteur, soit 11% et 6% des ACL de METIS. Afin d'accompagner les jeunes chercheurs, METIS les encourage à suivre les

formations à la rédaction scientifique et en anglais via les écoles doctorales ou la formation des personnels. Environ 13,5% des publications impliquent des personnels d'appui à la recherche.

Référence U3.3. La production scientifique de l'unité respecte les principes de l'intégrité scientifique, de l'éthique et de la science ouverte. Elle est conforme aux directives applicables dans ce domaine.

En termes d'intégrité scientifique et d'éthique, tous nos doctorant.e.s sont formé.e.s par l'Ecole Doctorale (ED 918 GRNE) et les membres de METIS ont accès à un référent à l'intégrité scientifique au niveau de l'Université. C'est un membre de METIS qui assure ce rôle depuis mi 2022, et il a sensibilisé l'ensemble du personnel par un séminaire, ce qui pourra être renouvelé périodiquement. SU permet aussi à tous ses personnels de bénéficier d'un compte en accès libre vers un outil de prévention du plagiat et de détection des similitudes.

Les points sur lesquels les membres de l'unité sont particulièrement vigilants sont : (1) que les doctorants publient bien en premier auteur leur travail de thèse, en évitant les revues prédatrices, avec quelques exceptions pour celles qui sont bien citées dans nos domaines (par exemple Water chez MDPI avec un IF=4) ; (2) la traçabilité des données par carnets de laboratoire en chimie et en microbiologie et des serveurs de versions pour les logiciels (pyNuts, ORCHIDEE), et par publication de plus en plus fréquente dans des data papers et/ou des serveurs de données en open source (PANGAEA, Zenodo, ...), qui répondent à la politique FAIR. Les jeunes chercheurs sont accompagnés dans cette démarche par leurs encadrants et superviseurs, lesquels se forment sur le tas, et par échanges avec la communauté.

Concernant la politique de science ouverte, l'unité suit les directives de ses tutelles. Elle incite à privilégier les publications open-source comme indiqué ci-dessus, et elle émet un rappel annuel à déposer nos publications dans HAL et nos jeux de données sur des serveurs données. Le bilan de nos publications ACL selon HAL fait état de 84% de publications en open access.

Synthèse de l'autoévaluation

L'UMR METIS couvre un ensemble de champs disciplinaires dans le domaine des Surface et Interfaces Continentales, ce qui génère à la fois une production scientifique dans les différentes disciplines et à l'interface entre celles-ci. Cette production scientifique est publiée sous forme d'articles dans des revues internationales reconnues (très massivement Q1). Elle est très équilibrée entre les deux départements tout en prenant en compte certaines différences disciplinaires liées aux formats et aux spécificités des communautés représentées (i.e., chapitres d'ouvrages et rapport techniques). Les scientifiques de METIS sont particulièrement vigilants à l'intégrité scientifique et aux bonnes pratiques scientifiques comme la préférence pour les publications affranchies du "paywall" (e.g., archives ouvertes) et la mise à disposition des données (pratiques des FAIR data).

Domaine U4. Inscription des activités de recherche dans la société

Référence U4.1. L'unité se distingue par la qualité et la quantité de ses interactions avec le monde non-académique.

Les interactions de l'UMR avec la société sont fortes. Elles sont visibles à travers plusieurs critères. D'une part, les ressources contractuelles de l'unité auprès des collectivités et d'industriels se montent en moyenne sur la période 2017-2022 à 1122 k€, soit 55% des ressources totales de l'unité (hormis les salaires des CDD). Les réponses aux appels d'offres nationaux et européens comptent pour 35% du budget et les ressources récurrentes pour 10% du budget seulement. Les thèses avec un financement CIFRE (financements non comptabilisés ci-dessus) sont au nombre de 7, soit plus de 10% des thèses. On note cependant une différence importante entre les deux départements, les ressources d'origine industrielle du département H2GS2 étant beaucoup plus importantes que celles du département BIOGEO, qui sont quasi nulles, alors que ses ressources d'origine régionale (collectivités) sont les plus importantes. Les développements techniques liés à la géophysique expliquent certainement ce tropisme plus industriel, mais on peut noter également plusieurs contrats industriels importants dans le domaine de l'hydrologie (EDF, ORANO).

Les membres de l'unité sont également présents dans plusieurs conseils scientifiques d'organismes orientés sur la recherche mais aussi d'organismes en charge de la gestion de l'environnement (SIAAP, programme Seine-Aval, Mission inter-estuaire de l'OFB, plan Ecophyto, estuaire de la Seine, SCHAPI, AESN, grotte de Lascaux, BRGM) et de commissions d'expertise (ANSES, Conseil National de Protection de la Nature, UNESCO).

Les interactions les plus riches avec la société résultent d'une relation de confiance élaborée sur le long terme. Le programme PIREN-Seine, hébergé par l'unité, est un exemple pertinent de la méthode qui permet de co-construire des sujets de recherche à partir d'interactions entre les chercheurs et la société. Elle est très formalisée par le programme (ateliers, synthèses, comité de suivi). Les retombées des nombreux projets menés par l'UMR avec/pour la société civile sont multiples, comme des méthodes rapides de contrôle du sous-sol des voies ferrées, la reconnaissance du potentiel des ressources en eau d'une région, la prévision de la qualité de l'eau en vue de la baignade en Seine à Paris en 2024, ou encore l'orientation des politiques de protection de la qualité de l'eau de l'AESN. Plus récemment, une convention avec l'agence régionale des espaces verts (Ile de France - Nature) a permis de mettre en place une expérimentation de long terme sur les amendements en biochar pour améliorer les fonctions d'un technosol, avec des perspectives pour le management durable des espaces verts en île de France.

Par ailleurs, des chercheurs de l'unité sont fréquemment sollicités pour communiquer dans de grands médias sur les sujets qui intéressent l'opinion publique comme la sécheresse (plus d'une dizaine d'interventions en 2022) ou les projets de baignade dans le contexte des Jeux Olympiques à Paris.

Référence U4.2. L'unité développe des produits à destination du monde culturel, économique et social.

De par leurs relations avec le monde non-académique précisés ci-dessus, les membres de l'unité sont sollicités pour participer à la rédaction de rapports d'expertise (signalements et saisines de l'ANSES, avis du CNPN...) ou encore à l'élaboration d'un indicateur d'eutrophisation des zones côtières pour l'Objectifs du Développement Durable (ODD N°14). La distorsion entre les deux départements dans le paragraphe précédent est également visible ici, les produits à destination du monde non académique étant plutôt plébiscités par les collectivités que les industriels.

Enfin, l'ouverture des activités de recherche du PIREN Seine et de la ZA Seine vers les acteurs du territoire augmente les sollicitations de participation à des présentations à destination des acteurs locaux. Ces interactions se traduisent principalement par des participations à des tables rondes, colloques ou interventions auprès des acteurs locaux (Colloque FNE, interventions pour le SIAAP, le SEDIF, réseau d'agriculteurs). Le site internet du PIREN Seine permet d'accroître la diffusion des connaissances par la mise à disposition en téléchargement de supports multimédias et de documents de synthèses des recherches auquel les membres de l'unité participent : fascicules thématiques, 4 pages adressés à un large public. La cellule de communication sert d'intermédiaire pour relayer les demandes d'interview sur les sujets d'actualité.

Référence U4.3. L'unité partage ses connaissances avec le grand public et intervient dans des débats de société.

Le rattachement de l'UMR à l'IPSL a permis de fédérer les forces en matière de communication vers le grand public et les scolaires. Chaque année, les personnels participent aux événements qui se déroulent sur le campus (Fête de la Science, Profs en fac) en proposant des animations autour d'une maquette représentant l'écoulement en milieu souterrain ou en réalisant des démonstrations dans le laboratoire de chimie analytique. Les stagiaires de 3ème sont également accueillis à METIS à raison d'une demi-journée sur leur semaine d'observation pendant 2 à 3 sessions annuelles. Des interventions sont également réalisées à l'extérieur du campus dans les collèges de la région (les savanturiers, interventions ponctuelles). Les enseignants chercheurs participent à la PSL week qui permet aux étudiants de PSL de découvrir de nouvelles disciplines pendant une semaine banalisée pour tous les établissements de rattachement. Les membres de l'unité sont régulièrement sollicités par les médias sur des sujets d'actualité : l'impact du changement climatique, la baignade en Seine pour les Jeux Olympiques 2024, l'impact de l'incendie de Notre Dame de Paris...

Synthèse de l'autoévaluation

Forces : L'unité a une forte activité au contact de la société. Elle est fortement impliquée dans des projets intéressants directement des gestionnaires publics de l'eau et du milieu. Les projets concernés sont en général financés par ces gestionnaires (programme PIREN-Seine co-financé par un consortium d'acteurs régionaux, contributions aux actions menées par le ministère de l'environnement sur les thématiques du climat et de l'eau, travaux sur les technosols menés avec l'agence régionale des espaces verts, études pour les AASQA, travaux sur la baignade en Seine...). Ces travaux l'amènent à communiquer à un public averti au travers de documents largement diffusés, notamment au travers des publications du programme PIREN-Seine. L'unité collabore également avec des industriels en interaction forte avec le milieu en raison de leurs infrastructures (EDF, Orano, SNCF...), plusieurs contrats CIFRE ont été mis en place au cours de la période. Plusieurs des sujets traités par l'unité, comme les problématiques liées au climat et à la sécheresse font périodiquement l'actualité, et des chercheurs de l'unité sont sollicités pour intervenir dans les médias. D'autres sujets (baignade en Seine, découvertes archéologiques, problématique des pesticides) ont aussi fait l'objet d'interventions grand public. Enfin, sous l'égide de l'IPSL, l'unité participe à des opérations de communication vers les scolaires.

Faiblesses : Ces activités sont certes importantes, les thématiques abordées par l'unité nous incitent à fortement communiquer, elles font connaître nos travaux et nous sommes volontaires pour les poursuivre. Mais elles sont aussi chronophages.

3-2 Autoévaluation de l'équipe BIOGEO

Domaine B1. Profil, ressources et organisation de l'équipe

Au 31/12/2022, le département BIOGEO est composé de 3 chercheurs CNRS (1 DR et 2 CR), 8 EC de SU (dont 2 Pr), et 4 EC EPHE. Les PAR permanents sont 7 (1 CNRS, 4 SU et 2 EPHE) et 7 personnels non permanents (3 CDD et 4 post doc ou ATER) et 3 émérites sont aussi rattachés. L'association avec les microbiologistes de l'UMR M2C permet de renforcer le département (1 Pr, 2 MC). Ainsi, le département est constitué de **35 membres auxquels s'ajoutent 7 doctorants**. Depuis le début du contrat d'unité, l'EPHE a soutenu l'équipe de chimie des contaminants par le recrutement d'un MCF suite au départ à la retraite d'un directeur d'études et une MCF et le recrutement d'une technicienne pour remplacer le départ à la retraite d'une technicienne et une adjointe technique. Côté CNRS, 2 IR sont parties en mutation en 2017 et 2018, 1 DR CNRS est partie à la retraite en 2021 et 1 est devenue émérite en 2022. Seul 1 CR CNRS a renforcé le département en 2018. Nous avons également perdu ½ poste de T SU mutualisé avec ISTEP.

2 PAR sont des Agents de Prévention (AP) installés dans chacun des 2 couloirs où se situent les laboratoires d'analyse et de préparation des échantillons.

Référence B1.1. L'équipe s'est assigné des objectifs scientifiques pertinents.

Le département BIOGEO est composé de 18 chercheurs et enseignants-chercheurs (les EC de l'UMR M2C inclus) intégrés dans 3 groupes de recherche et leurs 4 pôles techniques associés, chaque groupe leur apportant un soutien scientifique spécifique, contribuant à son équipement via des projets et étant un utilisateur principal du pôle.

Le département participe à des initiatives lancées par les tutelles permettant l'interdisciplinarité. Il a ainsi bénéficié d'une thèse MITI (INEE - INSU) sur l'identification des facteurs environnementaux de l'antibiorésistance et d'une thèse financée par l'ITE sur les relations hôte - parasites. Le portage de la ZA Seine au sein du département permet d'inscrire les sites expérimentaux au sein du réseau e-LTER. Un colloque organisé en 2022 était destiné à réfléchir et à organiser la contribution française à la construction de l'IR e-LTER.

Au sein de l'IPSL, les chercheurs du département participent à l'animation du thème « Biogéochimie terrestre, écosystèmes et ressources » (BIOTECA) qui vise à étudier l'impact des activités anthropiques sur les cycles

biogéochimiques dans les écosystèmes terrestres. Ils sont également impliqués dans le thème "Composair" sur la Composition atmosphérique et qualité de l'air ou dans le comité de pilotage ICEO (Centre d'observation de l'IPSL). Les jeunes chercheurs ont également bénéficié de financements proposés par SU pour le démarrage de nouveaux projets (Emergence, Tremplin).

Référence B1.2. L'équipe dispose de ressources adaptées à son profil d'activités et à son environnement de recherche et les mobilise.

Les plateformes de géochimie et de chimie des contaminants nécessitent un soutien financier considérable qui est majoritairement supporté par des contrats de recherche. Les départements (et les chercheurs) ne sont pas directement soutenus financièrement par l'unité, mais les pôles techniques le sont. Ces pôles techniques nécessitent des investissements lourds pour maintenir le potentiel de recherches innovantes. Ils facilitent les interactions au sein du département et la soumission à des projets de recherche. Ainsi, les chercheurs et EC du département BIOGEO participent activement à la levée de fond de l'unité à raison d'environ 1000 k€ par an (640 K€ /an+ 50% des ressources communes). Ce montant est principalement lié à des contrats avec des collectivités territoriales (dont le PIREN Seine) pour 600 k€ par an et par la participation à de nombreux projets de recherche nationaux (7 ANR, 10 EC2CO et autres projets financés par le CNES, Ecophyto, ou l'ADEME) à raison de 235k€ par an en moyenne. Les chercheurs participent à 3 projets européens, avec cependant une contribution financière modeste (25k€/an en moyenne). La reconnaissance des pôles techniques au niveau national permet aussi de solliciter des investissements auprès des tutelles (SU via l'OSU Ecce Terra mais aussi l'EPHE) pour des cofinancements d'équipements lourds. En cas de cofinancement obtenu, l'unité complète si besoin le financement sur ses ressources propres.

Synthèse de l'autoévaluation

Faiblesses : Le non remplacement des postes met en danger le fonctionnement du département. Avec la perte de 2 DR CNRS et le prochain départ d'un professeur SU, l'animation scientifique repose sur les CR et les EC déjà en sur-service d'enseignement. Le manque cruel d'EC SU en biogéochimie rend très difficile le maintien des activités de recherche.

Forces : Les permanents s'impliquent dans leur environnement de recherche et sont très actifs dans le montage de projets de recherche et dans la levée de fonds malgré les charges excessives d'enseignement. Ils profitent des opportunités offertes par les tutelles et les structures de recherche dont dépend l'unité. 5 HDR ont été soutenues et il y a un fort potentiel pour assurer la continuité des activités de recherche en cas d'opportunités.

Domaine B2. Attractivité

Référence B2.1. L'équipe est attractive par son rayonnement scientifique et s'insère dans l'espace européen de la recherche.

Les membres du département BIOGEO bénéficient d'une très bonne reconnaissance scientifique. Outre les distinctions reçues (prix Albert Treibs de la Geochemistry Society, prix de thèse de l'académie d'agriculture). Ils sont très impliqués dans les CS d'établissements de recherche (AgroParisTech, EPHE, INSU, SIC-CNRS, Ifremer), de comités d'évaluation de la recherche (HCERES, CNECA, EC2CO, Ecophyto) et pour l'organisation de colloques (7 convensers). Ils sont invités dans des organismes de recherche étrangers (5 séjours) et ont été guest editor de 6 numéros spéciaux.

Référence B2.3. L'équipe est attractive par la reconnaissance de ses succès à des appels à projets compétitifs.

Le département participe et porte de nombreux projets : 7 ANR et de nombreux contrats auprès des collectivités territoriales, 10 EC2CO et 3 projets européens. Cette recherche permet de financer des thèses : sur les 12 thèses soutenues, 6 ont reçu un financement spécifique hors bourses du ministère. Ces contrats permettent également de financer des post-docs ou des ingénieurs (20% des effectifs du département). Les

projets sont équitablement répartis sur les 3 équipes du département. Des ATER sont également recrutés pour compenser le manque d'enseignants et affectés dans notre département. Les plateaux techniques sont principalement équipés et financés par ces programmes de recherche. La concertation préalable de nécessité de renouvellement d'équipement permet d'anticiper des demandes de cofinancement sur plusieurs projets pour une même année.

L'implication des membres du département dans l'animation scientifique du PIREN Seine au sein de 5 des 6 axes de recherche permet de fédérer la recherche interdisciplinaire sur les interactions contamination - matière organique - modélisation. Au sein de ces discussions, de nouveaux axes thématiques ont vu le jour comme la recherche sur le lien antibiotique - antibiorésistance (2 projets ANSES et 1 thèse CNRS MITI INEE/INSU).

Référence B2.4. L'équipe est attractive par la qualité de ses équipements et de ses compétences techniques.

Les plateaux de géochimie organique de METIS sont reconnus au niveau national (RÉGEF au CNRS et GEORG à SU) avec référencement des tarifs plateforme en géochimie organique et chimie des contaminants. Cette visibilité accentue les sollicitations et implications dans des projets de recherche. Un bilan a été réalisé sur la base des activités de 2022, montrant que 74% des analyses sont dédiées à l'équipe opérante contre 3 % à des collaborations internes, 8% en collaboration externe et 15% en prestation (cf tableau ci-dessous). Les activités de recherche adossées à ces plateformes sont directement liées aux activités des équipes de recherche des unités et favorisent la collaboration en interne. La prestation externe reste minime.

	Taux d'utilisation annuel %	Nombre d'analyses annuelles
Par l'équipe opérante	74	2804
En collaboration / accès interne	3	100
En collaboration externe	8	291
En prestation / service	15	567
Total :	100	3762

Les retombées sont également estimées par la valorisation de la recherche qui s'adosse à ces plateformes. Les publications sont majoritairement en lien avec les travaux de recherche de l'unité, mais les collaborations externes permettent aussi d'être visible par 5 publications malgré le faible taux d'utilisation.

La formation des étudiants en thèse et en master est aussi un engagement fort. Cela nécessite le maintien du personnel technique par les tutelles. L'EPHE a affecté un poste de technicien à l'unité en 2020 pour le remplacement de 2 départs à la retraite mais le ½ poste technicien SU en géochimie organique n'a pas été remplacé, ce qui fragilise le fonctionnement de la plateforme.

Il faut noter que la gestion financière académique rend difficile le maintien des plateaux techniques : l'achat de gros équipements nécessite la mise en place de cofinancements sur plusieurs contrats de recherche simultanément et par l'utilisation des prestations. Cependant, les recettes de la plateforme doivent être utilisées dans l'année et ne peuvent pas être capitalisées pour le renouvellement des appareils.

Synthèse de l'autoévaluation

Forces : les membres du département ont un très bon rayonnement scientifique et montrent une très bonne capacité à s'impliquer dans des programmes de recherche sélectifs. La levée de fond permet le maintien des plateaux techniques à un niveau de performance élevé.

Faiblesses : Le manque de personnel tant technique qu'en enseignement fragilise le fonctionnement du département. Les CDD compensent en partie ce manque mais demande des efforts supplémentaires dans le montage de projet, la sélection et la formation des vacataires. L'investissement sur crédits de recherche pour le maintien des plateaux techniques est rendu complexe par la gestion financière (annualisation des contrats de prestation, absence d'une ligne de crédit permettant de conserver la part d'amortissement du matériel sur plusieurs années).

Domaine B3. Production scientifique

Référence B3.1. La production scientifique de l'équipe satisfait à des critères de qualité.

Nos articles ACL sont publiés à environ 85% dans des revues du premier quartile de nos domaines de recherche. L'IF médian est de 5 (cf U3.1). Sur la période, nous comptons aussi 6 articles dans les grandes revues "généralistes". Les éléments BIOGEO du portfolio font apparaître des thématiques scientifiques du département (PF10 à PF14) mais s'inscrivent dans des problématiques plus globales. Ces thèmes sont principalement centrés sur :

- L'étude des pratiques agricoles et l'impact du socio écosystème dans la contamination. Ces travaux s'inscrivent dans le projet européen Agrogreen et le Piren Seine. l'avancée de ces recherches jusqu'au développement de la modélisation permet d'intégrer la notion de changement climatique (PF10). 51 ACL ont été publiés sur ce thème.
- La caractérisation de la matière organique peut être vue comme un traceur des paléoenvironnements, sujet que nous traitons avec de nombreuses collaborations internationales, (PF12), ou comme un objet d'étude permettant de comprendre les processus de transformation (PF13). Les approches sont diverses, elles s'appuient sur l'analyse moléculaire de la matière organique, donnant accès à l'origine et la réactivité des matières organiques, et sur des expérimentations en mésocosme ou *in natura*. Le lien avec la microbiologie environnementale rend ces approches pluridisciplinaires. 50 ACL ont été publiés sur ce thème.
- Au-delà de l'étude de la matière organique, sa dynamique dans les environnements naturels ou anthropiques a des conséquences sur la circulation, la spéciation ou l'accumulation d'autres éléments : les micropolluants organiques (PF11), les éléments traces métalliques ou encore les pathogènes et virus. 28 ACL ont été publiés sur ce thème.
- La connaissance de la contamination des écosystèmes et la compréhension des transferts et de leurs impacts sur les organismes peut être obtenue par différentes approches disciplinaires (géochimiques, microbiologiques) ou pluridisciplinaires (écotoxicologiques, PF14). Ces travaux nécessitent le développement ou la mise au point d'outils méthodologiques (recherche de nouvelles substances, biomarqueurs, métrologiques (mise au point de nouveaux capteurs) et expérimentaux pour compléter les mesures de terrain et ainsi mieux appréhender ces processus. 61 ACL ont été publiés sur ce thème.
- Enfin, les approches historiques permettent de définir les trajectoires sur le long terme (PF1). Cette reconstruction dans le bassin de la Seine a permis de comprendre la qualification de l'état des lieux des cours d'eau actuels. 8 ACL ont été publiés sur ce thème.

Référence B3.2. La production scientifique de l'équipe est proportionnée à son potentiel de recherche et correctement répartie entre ses personnels.

Selon notre annexe bibliographique, le département a publié 207 articles ACL, soit **3.8 ACL par ETP-chercheur et par an, dont 85% sont classés en Q1** (IF médian = 5). 39 publications sont signées par les doctorants en premier auteur soit 18% des publications du département (21 doctorants inscrits). Le département BIOGEO a aussi publié 62 publications non ACL (rangs B, chapitres et rapports, d'où un rapport de 5 publications par ETP-chercheur et par an), et contribué à 232 communications à des congrès, dont 18 invitées à l'international.

Référence B3.3. La production scientifique de l'équipe respecte les principes de l'intégrité scientifique, de l'éthique et de la science ouverte. Elle est conforme aux directives applicables dans ce domaine.

Les activités du département dépendent grandement des activités de terrain et des plateaux techniques. une EC en écotoxicologie a suivi les formations pour obtenir l'agrément pour l'expérimentation animale et le risque électrique pour la réalisation de pêches électriques et la réalisation de prises de sang d'organismes aquatiques dans le respect du bien-être animal. Ces expérimentations se font en concertation avec des organismes accrédités (fédérations de pêche par exemple).

Au sein des plateaux techniques, les cahiers de laboratoires sont utilisés pour toutes les étapes de traitement des échantillons jusqu'à l'analyse. Chaque nouvel arrivant suit une formation auprès d'un de nos 2 AP avant d'effectuer des analyses. Un seul PAR a suivi la formation pour l'utilisation des carnets de laboratoire électroniques pour l'instant (les sessions de formation sont vite saturées). Cette nouvelle procédure proposée en priorité aux agents CNRS devrait être accessible à l'ensemble des PAR.

Synthèse de l'autoévaluation

Forces : Les CR et EC débutants sont très actifs et montrent la qualité de la sélection des candidats. Les PAR sont impliqués dans les publications, notamment dans les communications dans les colloques où le protocole analytique est mis en valeur.

Faiblesses : Les EC doivent faire face à des surcharges d'enseignement et de lourdes responsabilités administratives, notamment pour les plus anciens, ce qui nuit à leur taux de publication.

Domaine B4. Inscription des activités de recherche dans la société

Référence B4.1. L'équipe se distingue par la qualité et la quantité de ses interactions avec le monde non-académique.

Le département est très impliqué dans les projets de recherche menés en partenariat avec le monde non-académique. Outre le PIREN Seine que l'UMR porte depuis 30 ans, de nombreux projets font directement intervenir ces acteurs au sein même des projets ANR Egout (SIAAP, Ville de Paris), Ecophyto CISTOX (association Cistude nature...), ANSES OAK (Le Havre Métropole). De nombreux projets de recherche sont directement financés par des collectivités territoriales ou d'autres organismes tels que l'Agence de l'Eau (pour l'état des lieux des masses d'eau), avec Atmo Picardie pour la caractérisation de la contamination atmosphérique, avec la ville de Limeil Brevalle pour la restauration des Espaces verts... Il y a aussi de nombreuses interactions avec le syndicat de l'Orge (notamment pour l'accès à la station d'épuration d'Ollainville dans la cadre de MITI-CAR (thèse d'E. Marchand) et avec la fédération de Seine et Marne pour la pêche et la protection du milieu aquatique (projet EC2CO EXHECO + projet ANR HELP). Sur les 21 thèses du département, 4 sont financées par des bourses étrangères, 1 par la région Ile de France, 1 par l'ITN, 1 par l'ANR et 1 sur un projet européen.

Le projet Obépine a permis de former un réseau scientifique dédié au suivi de l'épidémie de COVID 19 par le biais des eaux usées. Ce réseau, directement soutenu financièrement par le MESR implique notamment des unités de SU et Eau de Paris.

Les membres du département sont également présents dans plusieurs conseils scientifiques d'organismes orientés sur la recherche mais aussi d'organismes en charge de la gestion de l'environnement (SIAAP, programme Seine-Aval, Mission inter-estuaire de l'OFB, plan ecophyto, estuaire de la Seine, AESN) et de commissions d'expertise nationales et européennes (ANSES, Conseil National de Protection de la Nature, UNESCO, JRC ISPRA). Ils ont été invités 6 fois par des organismes de recherche internationaux.

Référence B4.2. L'équipe développe des produits à destination du monde culturel, économique et social.

Le portage de la ZA Seine et l'implication forte dans le PIREN Seine des membres du département, les C et EC présentent régulièrement leurs travaux auprès des acteurs de l'eau : colloque PIREN Seine. Le site internet du PIREN Seine permet d'accroître la diffusion des connaissances par la mise à disposition en téléchargement de supports multimédias et de documents de synthèses des recherches auquel les membres de l'unité participent

: fascicules thématiques, 4 pages adressés à un large public. La cellule de communication sert d'intermédiaire pour relayer les demandes d'interview sur les sujets d'actualité.

Les membres du département participent également à la rédaction d'articles grand public proposés par le CNRS, participent au colloque FNE, interviennent pour le SIAAP, le SEDIF ou organisent des discussions auprès des agriculteurs (réseau ABAC). Les membres du département BIOGEO participent également à l'élaboration d'un jeu sérieux pour explorer les voies d'amélioration de la qualité de l'eau dans les bassins versants agricoles (projet Exp'eau inter ZA).

Référence B4.3. L'équipe partage ses connaissances avec le grand public et intervient dans des débats de société.

Le rattachement de l'UMR à l'IPSL a permis de fédérer les forces en matière de communication vers le grand public et les scolaires. Chaque année, les personnels participent aux événements qui se déroulent sur le campus (Fête de la Science, Profs en fac) en proposant des animations (prélèvement et analyse de l'eau en bord de Seine) ou en réalisant des démonstrations dans le laboratoire de chimie analytique. Les stagiaires de 3ème sont également accueillis à METIS à raison d'une demi-journée sur leur semaine d'observation pendant 2 à 3 sessions annuelles. Des interventions sont réalisées à l'extérieur du campus dans les collèges de la région (les savanturiers, interventions ponctuelles). Les enseignants chercheurs participent à la « PSL week » qui permet aux étudiants de PSL de découvrir de nouvelles disciplines pendant une semaine banalisée pour tous les établissements de rattachement (Impacts de l'activité humaine sur la santé et les écosystèmes, One Health / Eco Health). Les membres de l'unité sont régulièrement sollicités par les médias sur des sujets d'actualité : la baignade en Seine pour les Jeux Olympiques 2024, l'impact de l'incendie de Notre Dame de Paris...

Synthèse de l'autoévaluation

Forces : le département BIOGEO est très impliqué dans le partage de connaissance avec les acteurs du territoire. De nombreux projets de recherche s'inscrivent dans l'inter voire la transdisciplinarité. Les membres partagent leurs connaissances avec le grand public, les enseignants du secondaire et des scolaires. Ils sont impliqués dans les comités d'expertise.

Faiblesses : ces activités sont chronophages et peuvent nuire au taux de publication du département.

3-3 Autoévaluation de l'équipe H2GS2

Domaine H1. Profil, ressources et organisation de l'équipe

Du point de vue des ressources humaines, **le département H2GS2 compte actuellement 28 personnes** dont 12 enseignants-chercheurs, 3 chercheurs, 1 ingénieur d'étude, 1 technicien, 1 technicien en CDD, 4 post-docs et ATER, 6 émérites et associés, auxquels s'ajoutent 14 doctorants. Entre 2017 et 2022, 16 doctorantes et doctorants ont soutenu leurs thèses et 6 post-docs ont été accueillis. Le département accueille également chaque année des ATER répondant à certains des besoins pédagogiques récurrents en géophysique, outils numériques, en hydrologie et hydrogéologie (ces ATER ne sont pas nécessairement d'ancienn.es doctorant.es du département et sont systématiquement impliqués en recherche). Par rapport au précédent quinquennal, l'effectif des titulaires a été réduit d'un PAST (départ en retraite), d'un EC (promotion PR dans une autre université) et d'un technicien (départ non compensé) en géophysique ainsi que de 3 PR émérites et d'une DR en hydrogéologie. Ces départs n'ont que partiellement été compensés avec le recrutement d'une PR et d'un MCF en hydrogéologie durant cette période.

Référence H1.1. L'équipe s'est assigné des objectifs scientifiques pertinents.

Le département est reconnu pour son expertise technique en géophysique de proche surface et porte le réseau GEOFCAN « Géophysique des Sols et des Formations Superficielles », qui regroupe les géophysicien.ne.s de Sorbonne Université, du BRGM, de l'INRAe, de l'IRD et de l'Université Paris-Saclay. Dans la continuité de son investissement dans l'Equipex (PIA1) CRITEX (porteur de 2 WP), il est fortement impliqué dans l'Infrastructure de

Recherche (IR) OZCAR (<https://www.ozcar-ri.org>) s'appuyant en partie sur le réseau européen e-LTER. En plus d'être actif dans le fonctionnement d'OZCAR (SNOs [ORACLE](#), SNO Karst, et [H+](#)), le département a la co-responsabilité de son WP « instrumentation ». De la même façon, la géophysique du département est très impliquée dans l'Equipex+ (PIA3) TERRA FORMA (<https://terra-forma.cnrs.fr>) avec la responsabilité d'une de ses tâches. Cette implication a permis au département d'accueillir un IR CNRS au sein de la plateforme TMS de l'OSU Ecce Terra (cf. H2.4). Par ailleurs, le département participe activement à la fédération IPSL, notamment sur le développement des capacités hydrologiques du modèle de surface continentale ORCHIDEE, en lien avec le programme international CMIP6 de simulation du changement climatique. Plus largement, les travaux en modélisation hydrologique menés dans le département visent à quantifier l'influence des pressions anthropiques sur les hydrosystèmes, et contribuent au programme PIREN-Seine et aux efforts nationaux d'adaptation au changement climatique, dans des projets associant des gestionnaires de l'eau (public et privé, en France et dans les pays du Sud).

La valorisation d'une partie de nos activités se fait via la formation par la recherche (doctorants du sud en cotutelle) et le renforcement des capacités locales (activités d'enseignement théorique et pratique qui fédèrent 5 EC de l'équipe H2GS2) dans des pays du Sud (Sahel, Madagascar, Indonésie). Notre visibilité en ce domaine a été accrue par l'organisation de la conférence internationale (PF9) qui s'est tenue à Paris en mai 2022. L'équipe enseignante s'est aussi fixé pour objectif de développer une filière supplémentaire d'enseignement professionnalisant à SU au niveau Licence 2, il s'agit de la nouvelle Mineure Métiers Ressource et Qualité de l'Eau dans l'Environnement qui a été ouverte à la rentrée 2022 (PF3) et dont la L3 se fait en alternance et par apprentissage.

Référence H1.2. L'équipe dispose de ressources adaptées à son profil d'activités et à son environnement de recherche et les mobilise.

Il n'y a pas de « budget du département à proprement parler » (cf. U1.2 et tableau ressources financières) qui comme mentionné supra, a la particularité de bénéficier de beaucoup de contrats industriels (40% des ressources financières du département). On peut noter beaucoup de petits projets financés par les programmes de l'INSU (EC2CO, LEFE) mais aussi bien sûr des projets ANR, quelques projets CNES et des projets européens et internationaux (5). De manière très structurante, on note aussi une augmentation progressive du montant des ressources obtenues sur contrats dans le département (de 202 à 529 kE/an), alors que l'effectif permanent se résorbe, ou peut-être pour compenser cette diminution par des CDDs.

Du point de vue des locaux, même si elles et ils ont la chance de bénéficier d'un campus universitaire à Paris intra-muros (facteur d'attractivité non négligeable du département) les membres d'H2GS2 sont assez nombreux par bureau et il est souvent difficile d'accueillir stagiaires, nouveaux doctorants et post-docs, ainsi que collègues invités. Un point critique est le cantonnement au sous-sol des activités expérimentales du département, faute d'espace, qui laisse à désirer vis-à-vis du bien-être des expérimentatrices et expérimentateurs concernés. Ces aspects sont à équilibrer au niveau de l'Unité.

De la même façon, et comme mentionné au niveau Unité, le fonctionnement de notre système informatique est considérablement dégradé avec des risques majeurs de défaillance. Les développements numériques du département, notamment pour le prototypage des codes, s'en trouvent fortement altérés.

Synthèse de l'autoévaluation

Forces : Le département est très compétitif du point de vue des contrats et son budget lui permet de travailler dans de bonnes conditions. L'investissement des EC du département dans des filières de formation variées, dont deux M2 reconnus au niveau national, permet d'alimenter la formation par la recherche, à METIS mais aussi dans de nombreux autres laboratoires. L'intégration dans l'IPSL et l'OSU nous offre un cadre de collaboration et de financement large et porteur d'une certaine stabilité, ainsi qu'une visibilité accrue.

Faiblesses : Les moyens humains qui ne permettent pas de travailler dans de bonnes conditions comme cela est déjà mentionné au niveau Unité. Jusqu'en 2021, le pôle « instrumentation géophysique » (cf. H2.4) de METIS était composé d'un ingénieur d'étude et d'un technicien en électronique. Ce dernier poste est vacant suite à la retraite (plus tôt que prévu) du technicien. Depuis son départ, les membres géophysiciens ont pu compenser son absence, les activités de terrain étant ralenties par la crise sanitaire. Cependant, le retard accumulé dans l'avancée des projets de recherche doit être rattrapé et ce poste de technicien manque cruellement pour faire face au surcroît d'activité. Le non renouvellement de ce poste mettrait en péril les

activités de toute la géophysique et ses collaborations intra-UMR. Indépendamment de cette situation, presque toutes les activités de recherche de géophysique appliquée demandent de la conception innovante et des preuves de concepts et ne peuvent être menées à bien qu'avec un pôle « instrumentation géophysique » doté de moyens humains pérennes.

H2GS2 a aussi besoin du recrutement à court terme d'une ou d'un EC pour chacune des deux disciplines qui le compose. Les EC actuels sont en fort sur-service, ce qui est partiellement compensé par le recrutement de 2 à 4 ATERs chaque année. Cette solution court-termiste ne permet pas de répartir les responsabilités, alors même que nous nous impliquons dans de nouvelles formations, y compris professionnalisantes (**PF3**). Pour la recherche aussi, nous manquons aussi de forces pour porter des projets nouveaux, animer les actions et soutenir les équipes (EC mais aussi CNRS).

Domaine H2. Attractivité

Référence H2.1. L'équipe est attractive par son rayonnement scientifique et s'insère dans l'espace européen de la recherche.

Le département fait preuve de rayonnement scientifique à travers 3 prix, son appartenance à des académies (3), son implication dans des sociétés savantes (9), ses responsabilités éditoriales (19), les séjours à l'étranger (13), conférences invitées (7), invitation de collègues étrangers (4), et organisations de manifestations scientifiques internationales (13, dont la conférence "Groundwater, keys to the sustainable development goals", IAH/UNESCO, **PF9**), les participations à des comités scientifiques (9), instances d'évaluation (14) et d'expertise (2).

Référence H2.3. L'équipe est attractive par la reconnaissance de ses succès à des appels à projets compétitifs.

Le département obtient des financements de contrats internationaux et européens (IAEA, US Air Force, Belmont Forum, Consortium Mont Terri, ITN ENIGMA), de projets nationaux comme ANR, projets CNRS type EC2CO, LEFE, NEEDS, MITI et 80-PRIME, de projets CNES, de projets régionaux (DIM) et/ou locaux (FIRE, OSU, IPSL, PIREN-Seine, associations). Le département est impliqué avec financements dans le cadre du PIA avec OPUS, IP/Ocean, EUR-IPSL, CRITEX, Terra Forma. Les contrats de R&D avec des partenaires industriels (avec thèses CIFRE très souvent) sont une source très importante de financements pour le département également (CEA, EDF, ORANO, Danone, ANDRA, SNCF Réseau, Zonghe international, Envisol).

Référence H2.4. L'équipe est attractive par la qualité de ses équipements et de ses compétences techniques.

Le département pilote l'observatoire Saint-Martin-le-Noeud (PF7) du SNO Karst (IR OZCAR) : nous assurons le suivi des observations, et le développement du parc instrumental (sources de financement: Région Ile de France: R2DS 2011 et 2016, EC2CO, fédération IPSL), pour mieux comprendre les transferts d'eau et de solutés dans la zone non saturée. Ces travaux sont menés en collaboration avec le département BIOGEO et M2C à Rouen pour le transfert des contaminants et les problématiques sanitaires, et avec le Cerema pour estimer la stabilité des piliers qui soutiennent cette carrière souterraine. Nous adaptions aussi des systèmes de mesure de la quantité et qualité des eaux aux spécificités des sites miniers (e.g. forte acidité), en partenariat avec les industriels en charge de l'après-mine. Le département dispose aussi d'un parc instrumental pour l'hydrométrie (eaux de surface et eaux souterraines), qui est déployé pour la recherche et pour l'enseignement, et dont la jouvence est largement assurée par les crédits d'enseignement. H2GS2 porte par ailleurs le code ORCHIDEE labellisé par l'INSU, avec de fortes collaborations au niveau IPSL. Les applications pour la modélisation du changement climatique et de ses impacts apportent une forte visibilité internationale (cf les projets internationaux IGEM et BLUEGEM avec Taiwan, **PF8**), et contribuent à l'attractivité envers les doctorant.e.s et post-docs (6 et 6 respectivement pendant la période, dont une grande majorité d'étrangers de tous les continents).

En matière d'équipements, H2GS2 est porteuse de la plateforme Terre-Mer-Sols de l'OSU ECCE TERRA (TMS) qui comprend 3 parcs d'instrumentation pour l'acquisition de données marines et terrestres. Elle est en particulier engagée dans le suivi du sous-parc « Sols », qui regroupe des instruments d'étude de la Zone Critique (ZC) et des surfaces et interfaces continentales. Il comporte du matériel de géophysique de proche

surface, d'hydro(géo)logie et de biogéochimie. Le budget annuel est estimé à 40-50 k€/an, réparti sur 10-15 k€/an pour le fonctionnement et l'animation scientifique, et 30-35 k€/an d'investissement. Les financements sont gérés en majorité via des ressources propres d'H2GS2 (budget de projets et contrats) et via des subventions annuelles sur demande à Sorbonne Université pour l'investissement et à l'OSU Ecce Terra pour le fonctionnement. Ces demandes font systématiquement l'objet de cofinancements. A noter qu'une part importante du parc a été assurée par les filières d'enseignement. Le prêt de matériel à d'autres équipes est sans contrepartie, sauf besoin de maintenance avant ou après l'échange. Certains échanges sont formalisés dans le cadre du réseau GEOFCAN « Géophysique des Sols et des Formations Superficielles ». Le parc bénéficie par ailleurs des moyens expérimentaux de l'Equipex CRITEX et contribue aux travaux du programme PIREN-Seine (<https://www.PIREN-seine.fr>), de l'Infrastructure de Recherche OZCAR (<https://www.ozcar-ri.org>) et des observatoires associés comme par exemple le réseau H+ (<https://hplus.ore.fr>). Les équipes associées au parc participent aux développements instrumentaux menés dans le cadre de l'Equipex+ TERRA FORMA (<https://terra-forma.cnrs.fr>). Du fait de l'implication historique de Sorbonne Université (ex Paris 6) dans les développements en géophysique appliquée, les équipements et instruments géophysiques du sous-parc « Sols » de la plateforme TMS couvrent la quasi-totalité des méthodes (sismiques, électriques, électromagnétiques, magnétiques et gravimétriques) et offre une plateforme unique en France.

Les appareils du sous-parc « Sols » de la plateforme TMS sont principalement de fabrication industrielle, mais il existe aussi, en géophysique, des prototypes développés à H2GS2. Le parc s'appuie en effet sur un pôle "développement instrumental" de METIS et hébergé par H2GS2. Les activités de recherche de géophysique appliquée demandent de la conception innovante et des preuves de concepts. Le pôle "développement instrumental" est donc chargé de la définition des spécifications techniques, de la réalisation ainsi que des tests en laboratoire de prototypes d'instruments de mesures géophysiques innovants qui une fois finalisés sont intégrés au sous-parc « Sols » de la plateforme TMS. Il participe également à leurs tests in situ (sur le terrain) et accompagne les nécessaires ajustements technologiques au regard des retours d'expérience. Le pôle comprenait jusqu'en 2021 un technicien (départ anticipé non remplacé) encadré par un ingénieur d'étude, chargé également du développement des codes d'acquisition et de prétraitements des données, et aidant à la rédaction des notes techniques et manuels d'utilisation associés. Le pôle a ces dernières années développé ses compétences en termes de programmation d'applications sur téléphones mobiles et tablettes. Il a mis en place de nouvelles ergonomies logicielles, installé et testé des outils et du matériel d'électronique portables et « low-cost » pour le développement futur de nouveaux instruments de géophysique (miniaturisation, portabilité, versatilité).

Qu'il s'agisse du sous-parc « Sols » de TMS ou du pôle DI, les besoins sont croissants, d'autant plus suite à l'implication d'H2GS2 dans les réseaux et programmes nationaux cités *supra*, avec en particulier l'Infrastructure de Recherche OZCAR (hydrogéophysique) et l'Equipex+ TERRA FORMA (biogéophysique). Ces structures, ainsi que l'OSU Ecce Terra, l'UFR TEB et le CNRS/INSU soutiennent activement METIS dans cette voie. H2GS2 a, en 2022, grâce à son engagement et à ses soutiens, pu obtenir un poste d'Ingénieur de Recherche « Expert en développement d'expérimentation » pour travailler avec TERRA FORMA sur les observatoires de l'IR OZCAR via la plateforme.

De plus, de nouvelles perspectives s'ouvrent au sein de METIS pour l'élaboration de nouveaux capteurs dans le domaine de l'hydrologie et de la chimie de l'environnement, avec des projets d'importance sociétale, soutenus par Emergence Ville de Paris ou le MITI 80 | PRIME (CNRS INSU), ce qui milite pour un renforcement du pôle développement instrumental.

Synthèse de l'autoévaluation

Forces : Forte attractivité du département avec de nombreuses coopérations et une implication dans les réseaux et infrastructures au niveau national (qui s'appuient très fortement sur les compétences du département)

Faiblesses : Manque de moyens humains pour maintenir cette attractivité et assurer le fonctionnement des plateformes.

Domaine H3. Production scientifique

Référence H3.1. La production scientifique de l'équipe satisfait à des critères de qualité.

Nos articles ACL correspondent à nos principaux thèmes de recherche, à savoir la géophysique, l'hydrologie, l'hydrogéologie, avec des points forts sur l'instrumentation hydrogéophysique (**PF2, PF5, PF6, PF7**) et l'étude de l'anthropisation croissante des milieux (cf **PF1, PF8, PF9**). Ces articles sont publiés à environ 85% dans des revues du premier quartile de nos domaines de recherche. L'IF médian est de 4.5 (cf U3.1). Sur la période, nous comptons aussi 6 articles dans les grandes revues "généralistes" (Nature group).

Référence H3.2. La production scientifique de l'équipe est proportionnée à son potentiel de recherche et correctement répartie entre ses personnels.

Selon notre annexe bibliographique, le département H2GS2 a rédigé 206 publications ACL (dont 58 et 39 sont signées par des doctorant.e.s et post-doc en 1er auteur), soit **3.8 ACL par ETP-chercheur et par an**, auxquelles s'ajoutent 104 autres publications (rangs B, chapitres et rapports, d'où un rapport de 5.7 publications par ETP-chercheur et par an). Le département compte aussi 238 communications en congrès, dont 17 invitées à l'international. H2GS2 ne propose pas de stratégie spécifique de diffusion des connaissances dont le moteur est naturellement la réalisation de thèse de doctorat et la présence de post-docs accompagné.e.s pour cela par les personnels permanents. Il existe cependant un déséquilibre relativement fort en ce qui concerne les publications en premier auteur pour les membres EC et CR/DR d'H2GS2, mais relativement faible en ce qui concerne les publications comme co-auteurs de doctorant.e.s encadré.e.s. H2GS2 a fait de très bons recrutements car les plus jeunes sont parmi les plus publiants, mais le manque de moyens humains pénalise fortement les EC qui subissent un sur-service d'enseignement très important et/ou cumulent les responsabilités pédagogiques (des niveaux Licence à Master, en école doctorale) et d'intérêt collectif aux niveaux UFR/OSU, facultaire, universitaire et national (cf. rubrique "Autres responsabilités" de l'onglet 5 du tableau de caractérisation).

Référence H3.3. La production scientifique de l'équipe respecte les principes de l'intégrité scientifique, de l'éthique et de la science ouverte. Elle est conforme aux directives applicables dans ce domaine.

H2GS2, dont une partie des travaux sont expérimentaux, fait appel aux carnets de laboratoire pour garantir les suivis d'expériences qui le requièrent. De la même façon, les campagnes de terrain sont réalisées avec "des carnets de terrain" pour garantir la possibilité de réutilisation des données par des pairs compétents. Les pratiques étant variées, H2GS2 n'a pas mis en place de procédures générales mais chaque groupe de recherche a ses pratiques pour fournir ces garanties. Il en est de même pour l'archivage des données (géophysiques, hydrologiques, hydrogéologiques *etc*) qui est réalisé en local par chaque groupe selon ses pratiques. H2GS2 est cependant très impliqué au niveau national (cf. p. ex. avec le [SNO H+](#) et le SNO Karst) dans la mise en place de base de données ouvertes avec une réflexion conduite au long cours, sur les formats et modalités de mise à disposition des données quels que soient leurs types. Cette implication s'inscrit en amont d'initiatives qui dépassent largement le cadre d'H2GS2 mais dont les membres participent (cf. p. ex. Theia / OZCAR / DATA TERRA / e-LTER). Certains axes de recherches (développement de méthodes de traitement, d'outils de modélisation) ont largement évolué ces dernières années grâce à la facilité de partage des codes sources via des plateformes "user-friendly". Ainsi, le code du modèle ORCHIDEE est géré via un serveur de version, qui facilite la documentation des développements, la diffusion aux utilisateurs, et qui permet de fournir aux journaux scientifiques la version utilisée pour les travaux publiés. Ces pratiques et outils devront être généralisés pour une meilleure insertion dans l'espace européen de la recherche (de premiers jalons ont été mis en place via l'ITN ENIGMA).

Synthèse de l'autoévaluation

Forces : Bons rayonnements scientifiques grâce aux publications (cf. synthèse au niveau Unité) et aux fortes implications des membres d'H2GS2 dans les infrastructures, réseaux d'observation et grands programmes de recherche.

Faiblesses : Manque de moyens humains en enseignement. Les EC ont trop de responsabilités et sont trop surchargés en enseignement.

Domaine H4. Inscription des activités de recherche dans la société

Référence H4.1. L'équipe se distingue par la qualité et la quantité de ses interactions avec le monde non-académique.

Une part non négligeable des activités scientifiques d'H2GS2 est financée par l'industrie dans le cadre de contrats et de conventions de recherche, dont 7 thèses CIFRE, réalisées ou en cours. Ces coopérations sont basées sur l'application ou le développement d'approches maîtrisées par le département à des problématiques industrielles, en lien avec les défis environnementaux actuels (hydrologie et stabilité de terrain pour la pérennité des ouvrages en contexte ferroviaire ou de production électrique ou d'eau potable, ou la gestion hydrogéologique de l'après-mine (cf. thèses et contrats avec Danone, EDF, SNCF Réseau, ORANO, etc.). Le département développe aussi des projets de recherche transdisciplinaires avec les gestionnaires de l'eau ou à leur destination, dans le cadre large de l'évolution de la qualité de la ressource en eau de la craie (observatoire Saint-Martin-le Noeud) en partenariat avec le Conservatoire des Espaces Naturel des Hauts de France, ou de l'adaptation au changement climatique : thèses en partenariat avec des Agences de l'Eau (Rhin Meuse ou Seine Normandie via le PIREN-Seine), avec des communes (Agon-Coutainville, Manche), avec le gestionnaire privé Saur et le BRGM), et programme national Explore2 du Ministère de la Transition Écologique qui vise à mettre à jour les projets d'évolution des ressources en eau en France, et qui pourra alimenter un volet hydrologique aux "services climatiques" proposés par l'IPSL (projet engagé avec Véolia, mais sans publication, comme souvent dans ce contexte). Comme tous les projets financés par le Belmont Forum, le projet BLUEGEM intègre des parties prenantes non académiques, en l'occurrence la Mekong River Commission et l'OFB (Office Français de la Biodiversité qui chapeaute la gestion de l'eau au niveau national), pour mieux comprendre l'influence de l'irrigation et des eaux souterraines sur la disponibilité future des ressources en eau.

Enfin, comme évoqué au niveau Unité, le département est par ailleurs impliqué dans des instances non-académiques (e.g. AGAP Qualité) et des conseils scientifiques d'organisations non académiques (Agences de l'eau, Grotte de Lascaux, SCHAPI).

Référence H4.2. L'équipe développe des produits à destination du monde culturel, économique et social.

Comme mentionné en H4.1, H2GS2 travaille en étroite relation avec le monde industriel dans les domaines R&D à des TRL (technical readiness level) qui peuvent être élevées. Mais les résultats scientifiques sont pour leur majorité, en accord avec les industriels par conventions, rendus publics et disponibles à tous via des publications ou des jeux de données et codes en libre accès.

Référence H4.3. L'équipe partage ses connaissances avec le grand public et intervient dans des débats de société.

Les membres d'H2GS2 spécialistes en hydrogéologie et hydrologie sont fortement impliqués dans la fête de la science (déjà mentionné au niveau Unité) et proposent très régulièrement des interventions dans les médias et via les réseaux sociaux sur les problématiques en relation avec le changement climatique, les sécheresses et la gestion de l'eau. L'expertise en prospection archéo-géophysique est mise en valeur à travers des reportages télévisés (prospections électrostatique et géoradar sur le chantier de Notre Dame de Paris). Les membres spécialistes en hydrogéophysique et géophysique d'H2GS2 sont également impliqués dans la communication que l'IR OZCAR propose au grand public (p.ex. participation à l'expo Critical Zones Observatories for Earthly Politics at the ZKM Karlsruhe, de mai 2020 à janvier 2022; présentation au public lors des écoles d'été etc).

Synthèse de l'autoévaluation

Forces : Très bonnes relations avec le monde industriel et des coopérations fructueuses notamment à travers des thèses CIFRE et une bonne insertion professionnelle des doctorantes et doctorants.

Faiblesse : H2GS2 ne produit pas de brevet et n'accompagne pas la création d'entreprise alors que son expertise le permettrait.

4- TRAJECTOIRE DE L'UNITÉ

4-1 Bilan scientifique

Le bilan présenté ici se base sur les activités des deux départements qui constituent l'unité. Il concerne aussi les activités transversales qui ont été mises en place au cours de la période évaluée.

Bilan du département BIOGEO - Biogéochimie

Le département BIOGEO est le regroupement de groupes de recherche "historiques" basés sur des approches disciplinaires : GOME sur la géochimie organique et minérale, CNUTS sur la biogéochimie des nutriments et du carbone et CC sur la chimie des contaminants organiques. Si nous n'avons pas souhaité diviser le département en sous-équipes, des regroupements par compétences disciplinaires et le rattachement aux pôles techniques ont persisté. Ce travail mutualisé autour de ces pôles a progressivement évolué vers des thèmes de recherche pluridisciplinaires, particulièrement entre les approches (géo)chimiques, la microbiologie environnementale et l'écotoxicologie jusqu'à la modélisation des processus biogéochimiques. Les interactions entre les équipes ont été facilitées par les appels d'offres internes lancés chaque année par l'unité (les propositions émanant d'au moins 2 groupes de recherche étant jugées prioritaires). Certains projets déjà existants sont structurants (Piren Seine, GIP Seine Aval par ex) mais de nouveaux projets ont récemment débuté, montrant le dynamisme au sein du département (2 projets européens, 4 ANR, 2 Projets ANSES, 1 projet Ecophyto). Ces projets se structurent selon 4 grands thèmes de recherche :

- la dynamique temporelle : paléoreconstructions et trajectoires
- la caractérisation des environnements naturels et anthropisés
- les interactions biogéochimiques et rôle du vivant
- Le continuum Sol-Eau/Terre-Mer : de l'expérimentation à la modélisation

1. Dynamique temporelle : paléoreconstructions et trajectoires

Le suivi de la matière organique dans les environnements actuels est confronté à son devenir sur le temps long via la caractérisation d'archives anciennes (archéologiques ou sédimentaires) pour reconstituer certains paramètres climatiques ou environnementaux (température, pH, hydrologie, ...). Ces reconstitutions sont basées sur des approches multi-critères incluant notamment la quantification de molécules spécifiques ou la géochimie isotopique de macrorestes organiques physiquement identifiés (Mouraux et al., 2022).

1a. Paléo-températures et -pH basés sur les tétraéthers membranaires

Les composés organiques constitutifs des membranes microbiennes peuvent aider à obtenir des informations sur le fonctionnement, actuel et passé, des milieux terrestres et aquatiques. En effet, les microorganismes ajustent la composition de leurs membranes en réponse à un stress environnemental. Il est donc possible, via l'analyse de ces composés dans les archives sédimentaires, de reconstruire les conditions environnementales qui prévalaient au moment de leur biosynthèse.

Nous possédons une expertise reconnue à l'international quant à l'analyse des tétraéthers de glycérol, lipides microbiens constituant des marqueurs de température et de pH. Nos travaux récents autour de ces composés et de leurs organismes sources (archées et certaines bactéries) ont été tout autant mécanistiques (étude du mécanisme adaptatif en réponse à un changement de température, Naafs et al., 2018) qu'applicatifs (reconstruction des paléoenvironnements à partir d'archives sédimentaires, Inglis et al., 2018). Nous avons par exemple montré que l'adaptation membranaire chez les Archées oxydatrices de l'ammonium du phylum

Thaumarchaeota se traduit non seulement par une augmentation du degré de cyclisation des lipides mais également par la nature des têtes polaires qu'ils portent (Huguet et al., 2017; Huguet et al., 2019).

En travaillant aussi bien à l'échelle des microorganismes que directement dans les sols, nous avons par ailleurs démontré le potentiel des acides gras 3-hydroxylés, molécules produites par les bactéries Gram-négatif, comme nouveaux marqueurs de température et de pH en milieu terrestre (Véquaud et al., 2021). Nous avons ainsi pu proposer la première calibration mondiale entre les abondances relatives de ces composés et la température/le pH dans les sols via une approche originale d'apprentissage supervisé.

1b. Paléoenvironnements et géochimie isotopique de (micro)fossiles

La composition isotopique de la matière organique est intimement liée aux conditions environnementales au moment de sa biosynthèse. A condition que la signature isotopique des restes anciens n'ait pas été significativement affectée par la diagenèse ou la fossilisation, elle constitue un outil puissant pour reconstituer les écosystèmes du passé. Là encore nos travaux s'articulent en une phase méthodologique pour valider les approches et une phase de paléoreconstruction proprement dite (Tramoy et al., 2017).

Avec des archéobotanistes du MNHN, nous utilisons le $\delta^{13}\text{C}$ des bois anciens pour reconstituer le stress hydrique des arbres et mieux comprendre la gestion des forêts passées (Baton et al., 2017). Ces travaux sont partie prenante du chantier scientifique Notre-Dame de Paris visant, notamment, à proposer une reconstruction climatique à l'échelle annuelle de l'optimum climatique médiéval à partir des cernes de bois carbonisés de la charpente (Dufraisse et al., 2022). Ils ont permis la mise au point d'outils pour évaluer les modifications du $\delta^{13}\text{C}$ fonction du degré de carbonisation des bois/charbons. Nous avons également (1) démontré la préservation de la variabilité inter- et intra cernes du $\delta^{13}\text{C}$ dans des bois ayant subi des températures de carbonisation jusqu'à 600°C et (2) développé l'ablation laser couplée à un EA-irMS pour déterminer le $\delta^{13}\text{C}$ à l'échelle intra-cerne (collaboration Natural Resources Institute Finland).

Les roches archéennes contiennent des microstructures carbonées interprétées comme des microfossiles, vestiges des premières traces de vie terrestre. Ayant subi des températures de métamorphisme de 250 à 400°C, ces microstructures sont souvent considérées comme particulièrement dégradées, limitant ainsi l'observation de biosignatures morphologiques et/ou moléculaires. A travers la caractérisation des microfossiles à l'échelle micrométrique par NanoSIMS, les travaux de l'UMR ont permis de mettre en évidence l'existence d'une population de microstructures aux caractéristiques morphologiques et géochimiques singulières au sein de divers assemblages (3.0-3.4 Ga) (Delarue et al., 2017). Cette population se caractérise par (i) des rapports N/C élevés (proches de ceux mesurés sur les microorganismes modernes "frais"), (ii) des teneurs relativement élevées en P et (iii) une préservation exceptionnelle à l'échelle morphologique. Parmi les microstructures observées, nous avons mis en évidence divers spécimens présentant une "queue", trait morphologique suggérant l'existence d'une motilité active dès 3.4 Ga.

1c. Les trajectoires du bassin de la Seine

Reconstruire les trajectoires des contaminants dans le bassin de la Seine a nécessité d'une part de décrire l'évolution de pressions exercées sur les milieux aquatiques (ANR Huniwers, ANR Trajectoire), d'autre part de reconstruire l'évolution de la perception de la qualité de l'eau et des milieux sur les deux derniers siècles pour comprendre le cheminement progressif de la réglementation qui a permis d'aboutir à la qualification de l'état des lieux des cours d'eau actuels (Bouleau et al., 2017; **PF1**) (PIREN Seine, ANR Makara). La modélisation rétrospective des états passés du système Seine a conduit à s'intéresser aux modifications du système fluvial pour en améliorer la navigabilité, et les conséquences de ces aménagements sur le fleuve et les plaines alluviales adjacentes (projet ARCHISeine du PIREN Seine, projet TRAESSI du GIP Seine Aval).

Le suivi de substances telles que les médicaments et drogues illicites permettent de représenter de nouveaux paradigmes de l'origine urbaine de la contamination et de son évolution. Si les interactions entre matière organique et contaminants ont déjà été mises en évidence pour des substances hydrophobes (Le Gall et al., 2018), les interactions entre les argiles et des composés plus hydrophiles est plus récente (Ledieu et al., 2021; Le Gaudu et al., 2022; Thiebault & Boussafir, 2019). L'analyse d'une carotte sédimentaire a notamment permis de mettre en relation les teneurs en produits pharmaceutiques avec leur date de mise sur le marché et l'évolution de l'efficacité du traitement au sein des stations d'épuration le long de la Seine en aval de Paris

(PF11). En continuité de ce travail, l'ANR Egout œuvre à la création d'un observatoire long terme des flux anthropogéniques dans les eaux usées brutes. Des approches tant spatiales que temporelles y sont développées pour comprendre les facteurs socio-économiques contrôlant les flux géochimiques excrétés dans les réseaux. Certains contaminants seront particulièrement étudiés comme les médicaments et les drogues, ainsi que des traceurs du bol alimentaire ou de l'exposition, et des approches non ciblées seront réalisées pour avoir une empreinte chimique de l'eau usée et des sédiments. L'effet de modifications des habitudes de vie sera également étudié en concertation avec un panel de la population selon une démarche collaborative.

Le projet Obépine est un programme de surveillance environnementale du SARS-CoV2 dans les effluents urbains. Une telle stratégie par du postulat que la détection du coronavirus dans les eaux usées pourrait précéder la détection des premiers malades, qui ne représentent qu'une fraction des personnes contaminées. Le suivi dans les eaux usées permet ainsi de valider la représentativité des estimations obtenues à partir des tests individuels (Wurtzer et al., 2020; Wurtzer et al., 2021a-b; Wurtzer et al., 2022). Le projet a donné lieu à la constitution d'un GIS dont l'objectif est de promouvoir l'épidémiologie des eaux usées à d'autres pathogènes que le SARS-CoV2 et d'autres indicateurs de la santé des populations.

2. Caractérisation des environnements naturels et anthropisés

Le devenir de la matière organique (MO) est abordé par l'étude de processus clés dans différents environnements plus ou moins anthropisés et selon différentes approches : le couplage avec les cycles biogéochimiques des éléments traces (sélénium, molybdène, vanadium, ...) (Castrec-Rouelle et al., 2017) ou encore le suivi de matières organiques anthropiques réputées persistantes (biochars, microplastiques) (El Hayany et al., 2020).

Les cycles biogéochimiques de nutriments (C, N) ont été couplés à ceux d'éléments traces (Mo, V, Cd, Cu...) dans des environnements arctiques (Agnan et al., 2019), actuellement fortement impactés par les changements climatiques afin d'affiner la caractérisation moléculaire des matières organiques extraites à l'eau (MOD) : les quantités et les qualités des MOD produites par les végétaux sont spécifiques et les sources primaires de MOD ont été déterminées grâce aux composés récalcitrants. Le transfert d'éléments trace dans les réseaux trophiques a également été quantifié après avoir identifié leur origine dans les différents écosystèmes échantillonnés.

Les estuaires jouent un rôle économique et sociétal clé, puisque les trois-quarts de la population mondiale vivent dans les régions côtières. La qualité et la quantité de la MO jouent un rôle essentiel sur les processus biogéochimiques et trophiques se déroulant en milieu estuarien. Ces dernières années, nos travaux se sont concentrés sur l'estuaire de Seine, caractérisé par une concentration de population unique en France et par une forte activité agricole et industrielle. Nous avons déterminé les variations qualitatives et quantitatives de la MO le long de l'estuaire (projet GIP Seine Aval MOSAIC; thèse A. Thibault). Nous avons démontré que la qualité de la MO dépendait principalement du compartiment considéré (eau vs sédiment) et dans une moindre mesure de la zone d'échantillonnage (Thibault et al., 2019). Nous avons par ailleurs montré que les dynamiques de la MO, des contaminants organiques et des nutriments étaient étroitement liées.

Nos recherches se sont également intéressées aux vasières, dont les deux-tiers ont disparu en Seine ces vingt dernières années malgré leur rôle écologique majeur. Dans le cadre d'un projet interdisciplinaire mobilisant 11 laboratoires (projet GIP Seine Aval PHARESEE), nous avons cherché à mieux comprendre et modéliser le fonctionnement biogéochimique d'une vasière majeure de l'estuaire via des expérimentations sur le terrain et en laboratoire. Nous avons démontré que la saisonnalité avait un effet prédominant sur les caractéristiques de la MO et les processus microbiens se déroulant dans le sédiment.

En milieu périurbain/urbain, de nombreux espaces verts sont situés sur des sols aux fonctions dégradées tels que les technosols. L'amélioration des fonctions de ces sols constitue un enjeu majeur pour promouvoir un verdissement durable des villes du futur. A ce titre, l'incorporation de biochar (e.g. charbon végétal) peut constituer un levier pour stocker du carbone dans ces sols tout en améliorant certaines fonctions des sols comme la rétention des eaux et des nutriments. Dans le cadre d'une convention avec la collectivité île de France Nature, un site expérimental a été mis en place dans la commune de Limeil-Brévannes (94) pour documenter l'impact de l'incorporation de biochar (2% m/m) sur le cycle du carbone de ces sols et sur la

croissance des végétaux associés (*Miscanthus giganteus*, *Pennisetum alopeides* et *Lavandula angustifolia*). Les résultats préliminaires ont ainsi indiqué que les biochars étaient à l'origine d'une hausse des émissions de CO₂ et d'une diminution de la mortalité de *Lavandula angustifolia* suite aux vagues de chaleur de l'été 2022.

3. Interactions biogéochimiques et rôle du vivant

Le rôle des organismes dans les cycles biogéochimiques peut être étudié selon différentes approches : ils peuvent être vus comme des acteurs de la transformation de la matière organique ou de métabolisation des éléments chimiques, ou alors comme des organismes qui subissent la modification du milieu et qui peuvent alors servir de marqueurs d'effets d'une perturbation.

3a. Rôle des (micro)organismes sur le devenir de la MO

Les organismes du sol sont les acteurs majeurs de la transformation de la matière organique dans l'environnement. Les vers de terre recyclent une grande partie de la matière organique fraîche. Ils minéralisent une partie de la MO ingérée, les résidus sont incorporés et rejetés dans le milieu sous forme de turricules au sein desquels les interactions organo-minérales sont fortes. Afin d'évaluer le rôle de ces interactions organo-minérales sur la dynamique de dégradation de la MO, une expérimentation en mésocosme utilisant de la matière organique marquée au $\delta^{13}C$ a été menée. Ainsi la contribution des vers de terre à la minéralisation ou au contraire de la stabilisation de la MO fraîche a pu être mieux estimée (PF13).

Les champignons constituent également des organismes clés dans les sols : leur mycélium joue un rôle sur la circulation de l'eau et du carbone organique, ce sont les seuls à dégrader efficacement la lignine, tout en favorisant la stabilisation de la MO sur le moyen voire long terme. Le rôle des champignons sur le devenir de la MO a été étudié par des expérimentations en microcosmes visant à suivre (i) les transformations moléculaires de MO naturelles et (ii) la dégradation d'hydrocarbures aromatiques polycycliques. Le suivi de MO marquées différenciellement au ^{13}C a par exemple permis de mettre en évidence la dégradation préférentielle de polysaccharides lors des premières étapes de la décomposition par le champignon *Trichoderma harzianum*.

3b. Relations biote - contaminants

L'écotoxicologie a permis l'émergence de projets interdisciplinaires menés tant au sein de l'unité qu'avec les chercheurs associés de l'UMR M2C et d'autres unités (UMR 7372 CEBC notamment). Ces travaux sont menés conjointement avec les associations et fédérations de pêche en charge de la protection des espèces et des espaces naturels, et dans le respect du cadre réglementaire et législatif relatif à l'utilisation des animaux à des fins scientifiques. Plusieurs espèces ont été ciblées pour faire le lien entre la contamination du milieu et la réponse des organismes.

Dans le cadre du projet EC2CO EXHECO et du Piren Seine, une population de chabots a fait l'objet d'un suivi par Capture-Marquage-Recapture et d'une exposition à un herbicide, le S-métalochlor, par implant sous-cutané, afin d'évaluer les effets écotoxicologiques à différentes échelles biologiques (moléculaires, cellulaires, physiologiques, démographiques). Des effets délétères ont été identifiés à court terme (dommage cellulaire, stress oxydant, gain de poids, durant les deux premières semaines) mais se sont atténués sur le long terme (3 mois post-exposition), sans conséquence sur l'espérance de vie et le taux de survie et sans accumulation des pesticides ou de leurs métabolites dans les tissus des chabots. Ce suivi des effets écotoxicologiques par manipulation expérimentale des niveaux de pesticides, sur le terrain et en suivant des individus marqués est une approche innovante pour évaluer de façon plus réaliste les réponses des organismes aux pesticides dans leur milieu.

Le projet CISTOX a pour objectif de caractériser les voies d'exposition aux pesticides et les effets chez une espèce protégée, la Cistude d'Europe (*Emys orbicularis*), dans plusieurs zones humides du territoire métropolitain en fonction du contexte agricole et environnemental. Les effets potentiels sont évalués à plusieurs niveaux biologiques, via des biomarqueurs (stress oxydant, taille des télomères, perturbation endocrinienne), des indicateurs (microbiote, comportement, morphologie) et des suivis sur le long-terme (survie, démographie). Ce projet collaboratif financé par l'OFB - Ecophyto et porté par l'UMR CEBC, est possible grâce au partenariat avec la tour du Valat, association Cistude Nature, association Epiméthée.

Les relations biotiques, telles que le parasitisme, peuvent également jouer un rôle sur le devenir et les effets des polluants. Dans le cadre de la thèse de N. Molbert, il a été montré que les acanthocéphales, des parasites intestinaux, accumulent des polluants depuis les poissons-hôtes, les chevesnes, et que cette séquestration de polluants contrebalance les effets négatifs du parasitisme (Molbert et al., 2020). Les travaux menés sur le terrain et en mésocosmes au CEREEP-Ecotron Ile de France suggèrent que le parasitisme par ces acanthocéphales peut être bénéfique pour les poissons hôtes en milieux pollués (PF14).

La relation contamination - effet nécessite également d'adapter le protocole d'échantillonnage et d'analyse à la question posée. Les effets chroniques observés sur le vivant sont la résultante de facteurs environnementaux et écologiques globaux souvent peu détectables. Les préleveurs passifs ont l'avantage de représenter une exposition moyenne sur une période et offrent une meilleure sensibilité. Ils permettent également d'avoir une meilleure représentation de la biodisponibilité aux organismes aquatiques que les prélèvements de sédiments pour les micropolluants hydrophiles (POCIS) ou hydrophobes (Silicone Rubbers) (Alliot et al., 2018) mais dont les résultats sont encore à calibrer. Cette approche peut également s'adapter à l'exposition humaine à des contaminants par voie atmosphérique. Cette exposition par voie atmosphérique varie en fonction de la présence en phase gazeuse ou particulaire des micropolluants. Dans le cadre de la thèse de D. Le Bayon, nous avons étudié leur répartition selon la taille aérodynamique des particules. Il a été montré que les particules ayant un diamètre inférieur à 2,5 μm (PM_{2.5}) portaient la charge chimique et le potentiel toxique les plus élevés. Afin de caractériser plus précisément cette répartition sur les PM_{2.5}, l'acquisition d'un impacteur (cofinancement DIM QP) a permis de prélever les particules selon 10 fractions entre 0,056 et 18 μm et de réaliser leur analyse chimique distincte.

3c. Antibiorésistance : origine du résistome, rôle du biofilm et des sédiments

La microbiologie environnementale est une thématique au cœur des projets du département. L'association avec les microbiologistes de l'UMR M2C a permis de compenser le manque de forces au sein de l'UMR METIS. Plusieurs projets ont vu le jour grâce à cette association (PIREN Seine, deux projets ANSES OAK et PANDORE, thèse MITI 80 PRIME).

Ces projets ont été tout particulièrement orientés sur l'identification des proxys environnementaux propices au maintien de l'antibiorésistance dans les milieux naturels par le suivi en rivière et dans les eaux souterraines, par la pose de pièges à sédiments et des supports de biofilm. Dans les rivières, il n'a pas été montré de lien direct entre la teneur en antibiotiques et l'antibiorésistance. Les seuls antibiotiques ne sont pas à considérer mais plutôt des facteurs globaux chimiques (autres contaminants pesticides ou biocides) ou biologiques (vieillessement du biofilm, facteurs de biodégradation). La complexité de la matrice du biofilm affecte probablement la bioaccessibilité des contaminants et limite leur impact (projet Pandore).

Cette étude a été complétée par le projet ICAR financé par le CNRS-MITI, visant à comprendre le rôle de l'ichtyofaune comme vecteur de dissémination de bactéries antibiorésistantes. La thèse d'E. Marchand a permis d'étudier conjointement l'exposition à 1) divers antibiotiques et polluants susceptibles de favoriser une co-sélection de bactéries antibiorésistantes dans le microbiote de poissons dans l'Orge, affluent de la Seine, site atelier de la ZA Seine et 2) une contamination microbiologique notamment à des bactéries d'origine fécale en aval d'une station d'épuration. Il a également été question de décrire, grâce à un financement du PIREN Seine l'éco-dynamique des contaminants en lien avec l'antibiorésistance le long d'un réseau trophique dans une rivière urbanisée.

Enfin, dans les aquifères karstiques, l'objectif du projet ANSES OAK était d'évaluer le risque de transfert de bactéries antibiorésistantes en fonction des transferts de pesticides et d'antibiotiques dans des conditions hydrologiques à infiltration plus ou moins rapide. Différentes eaux souterraines ont été suivies selon un gradient de vitesses d'écoulement. Une chasse a été provoquée artificiellement dans les conduits karstiques du site de Norville, par une introduction de 20 m³ d'eau potable pour étudier le biofilm intra-karstique ainsi décollé. Il en ressort que les eaux souterraines sont globalement faiblement contaminées avec parfois un effet marqué de certains événements pluvieux. La présence des intégrons cliniques a été confirmée. Cependant, le pourcentage de bactéries résistantes à au moins un antibiotique reste faible. Aucun intégron ni antibiotique n'a par contre été détecté à St Martin le Nœud (PF2, site caractérisé par des écoulements lents).

4. Continuum Sol-Eau/Terre-Mer : de l'expérimentation à la modélisation

4a. Etude de processus et élaboration d'indicateurs

Le réseau ABAC (2011-2020) avait permis de quantifier les pertes d'azote par lixiviation et vers l'atmosphère en grandes cultures conventionnelles et biologiques au cours du mandat précédent, mais dernièrement le stockage et le déstockage du carbone ont été analysés en explorant différentes conditions hydrologiques, reflétant des possibles extrêmes climatiques (Garnier et al., 2022). Les données de ces interactions sol-eau (grâce au soutien de projets PIREN-Seine ; Sol-Eau, EC2CO ; HydroGES, ADEME), caractérisant le carbone organique dissous jusqu'au niveau de sa biodégradabilité, et les formes de l'azote (y compris les GES - CO₂, CH₄ et N₂O - associés aux transformations du carbone et de l'azote) n'ont pas été complètement exploitées. Plusieurs articles sont prévus (au moins 3) pour le prochain mandat intégrant les sols, les eaux souterraines, et les eaux de surface.

L'eutrophisation des zones marines côtières est le résultat des apports déséquilibrés de nutriments par les rivières, désormais en raison d'un excès d'azote, le phosphore ayant été considérablement réduit grâce à l'amélioration des traitements en stations d'épuration comme le montre la trajectoire des 50 dernières années sur la Seine en terme d'éléments nutritifs (Garnier et al., 2020). Un indicateur d'eutrophisation des zones côtières ICEP (indicator of coastal eutrophication potential) avait été développé par C-NUTS sur la base des équilibres nutritionnels des eaux (valeur relative des flux d'azote, de phosphore et de silice), à l'exutoire de la Seine et de fleuves du monde. Cet indicateur a récemment été inclus dans le panel des indicateurs des Objectifs du Développement Durable ([ODD N°14](#)). Cet indicateur a été nouvellement étendu au B-ICEP (Bay integrated indicator of coastal eutrophication potential) pour prendre en compte les caractéristiques des zones côtières réceptrices (morphologie, temps de séjours), les flux en nutriments des fleuves côtiers n'ayant pas les mêmes impacts s'ils sont dilués dans de vastes étendues d'eau ou concentrés dans des baies fermées (Garnier et al., 2021, Expertise JRC 2019). La pertinence de cette nouvelle approche, c'est-à-dire sa capacité à prédire l'ordre de grandeur des proliférations d'algues indésirables dans des baies particulières, a été démontrée en utilisant un modèle idéalisé de zone côtière permettant de quantifier le développement des algues marines (ZOCO, Billen et Garnier, 1997). Ces indicateurs peuvent être calculés pour une situation actuelle, passée ou prospective.

4b. Développement de l'approche GRAFS et scénarisation du système agro-alimentaire

Développée à l'UMR METIS depuis plusieurs années, la méthode GRAFS offre un cadre conceptuel pour l'analyse quantitative du fonctionnement des systèmes agro-alimentaires territoriaux en termes de flux de matière entre les terres agricoles, l'élevage, la consommation humaine et les pertes environnementales induites (Le Noë et al., 2017, 2018). Elle permet de calibrer sur une situation actuelle ou historique bien documentée un certain nombre de relations fonctionnelles reliant ces flux, telles par exemple que la relation entre la production agricole et les apports d'azote au sol à l'échelle des rotations de culture, ou la relation entre la production animale comestible et l'ingestion d'aliment par le bétail. A leur tour ces relations permettent de prédire l'évolution du système soumis à d'autres contraintes. Des scénarios prospectifs peuvent ainsi être élaborés. Cette démarche a été appliquée aux échelles nationales de l'Europe (Billen et al., 2021), puis a été approfondie à des échelles subnationales (en 123 Unités Spatiales, US correspondant au niveau NUTS2), pour calculer diverses variantes d'un scénario Business-as-Usual, ainsi qu'un scénario de généralisation des pratiques agro-écologiques et de réduction de la proportion de protéines animales dans le régime alimentaire humain, ainsi qu'un scénario correspondant aux préconisations de la stratégie Farm-to-Fork de la Communauté Européenne (Billen et al., 2022). L'analyse du scénario agro-écologique, montre qu'il est possible de nourrir le bassin de la Seine la France et l'Europe, en se passant d'engrais azotés de synthèse et d'importation extra-européenne d'aliments pour animaux, et avec moins de pollution hydrique et atmosphérique. Le scénario basé sur les préconisations de la stratégie Farm-to-Fork de la Communauté Européenne montre que celle-ci est insuffisante par rapport aux objectifs qu'elle affiche. Ces scénarios ont été quantifiés dans un gradient tempéré-Méditerranéen pour y évaluer les pertes environnementales en termes de lixiviation de l'azote et des pertes atmosphérique d'ammoniac et de protoxyde d'azote (Garnier et al., 2023a). Ce travail sur un gradient tempéré-Méditerranéen est le fruit d'une collaboration de près de 10 ans avec une équipe de l'Université de Madrid (Lassaletta et al., 2021) dans le cadre du projet international INMS et de son ouvrage International Nitrogen Assessment (INA) qui va paraître en 2023, avec un chapitre collaboratif coordonné par C-NUTS (Garnier et al., 2023b)

4c. Modélisation de la qualité de l'eau des réseaux hydrographiques : Modélisation biogéochimique et changement d'échelle

Une des applications de l'approche GRAFS réside dans son couplage avec le modèle Riverstrahler de la qualité des eaux de surface à l'échelle des bassins versants régionaux et son environnement Seneque (bassin de la Seine : Garnier et al., 2019 ; de la Loire : Garnier et al., 2018). L'approche GRAFS permet en effet le calcul des apports diffus et ponctuels aux réseaux hydrographiques. La confrontation des résultats de la modélisation de la qualité de l'eau avec les mesures disponibles permet de valider l'ensemble de la démarche, et l'utilisation des scénarios construits avec la méthode permet d'en calculer les effets en termes de qualité de l'eau.

La plateforme de modélisation pyNuts-Riverstrahler (incluant RIVE à l'échelle des processus microscopiques les transformations et transferts de matière entre les compartiments biologiques) qui propose un assemblage d'échelles inédit, puisque cet outil intégré permet non seulement de modéliser les réseaux hydrographiques dans leur gradient amont-aval, s'est déclinée à une échelle plurirégionale des zones côtières des bassins de la façade Atlantique Nord-Est, Desmit et al., 2018), et plus récemment à l'échelle de l'ensemble de tous les bassins versants français (projet nuts-STEauRY, OFB). La plateforme de modélisation pyNuts (Thieu et al. 2015), sert désormais de cadre pour accueillir de nouveaux développements tant en termes d'écosystèmes du continuum Terre-Mer (réservoirs, estuaires) que de processus microscopiques impliqués dans les cycles biogéochimiques. Elle également mobilisé pour des approches couplées avec des modèles du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique des hydrosystèmes : (i) le modèle CaWaQS de Mines Paris, afin de mieux quantifier les sources de contamination diffuses (contrats état des lieux & pressions diffuses pour l'AESN, réalisés 2017 et 2022), (ii) le modèle GR4J afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur le fonctionnement hydro-biogéochimique des rivières (EC2CO-LEFE MARICCA, Raimonet et al. 2018).

La modélisation des réservoirs du bassin de la Seine avait fait l'objet de développements dans les années 2000, qui ont été repris dans le cadre d'une thèse de doctorat (Yan X, juillet 2022) afin que ces objets « réservoirs » soient des modules intégrés du modèle pyNuts-Riverstrahler. Les travaux de doctorants ont porté sur l'expérimentation, l'observation de terrain et la modélisation. Les GES ont ainsi été quantifiés, en plus des nutriments, ce qui a permis d'établir des bilans biogéochimiques du carbone et des nutriments, de comprendre leur rôle d'élimination ou d'exportation sur les rivières en aval de ces retenues et d'effectuer une remise à jour du modèle réservoir (Barman). Quatre articles sont issus de ce travail (PF10).

La modélisation des estuaires, couplée aux outils C-NUTS, a été appréhendée avec des modèles développés à l'Université Libre de Bruxelles grâce au modèle simplifié C-GEM ou à l'IFREMER avec le modèle EcoMars-3D. La complexité du modèle Eco-Mars 3D n'a permis d'explorer le couplage Bassin versant-Estuaire-Zone Côtière que sur le système Seine (Garnier et al., 2019 ; Romero et al., 2019, Romero et al., 2022 ; Garnier et al., 2023). Le modèle C-GEM, plus générique permet un couplage plus facile et a été implémenté dans le cadre de 3 post-docs, non seulement sur la Seine (Laruelle et al., 2019), sur 7 estuaires de la côte atlantique française (estuaires de la Somme, de la Seine, de la Vilaine, de la Loire, de la Charente, de la Garonne et de l'Adour) (Wei et al., 2022) et plus récemment, déployé de façon générique à l'ensemble des estuaires français dans le cadre d'un couplage avec la plateforme pyNuts (projet nuts-STEauRY).

Bilan du département H2GS2 - Hydrologie, Hydrogéologie et Géophysique de Sub-Surface

Comme indiqué dans le contrat précédent, la composition du département H2GS2 est très proche de l'équipe constituée lors de la création de l'UMR METIS il y a bientôt 10 ans. Les objectifs scientifiques du département ont évidemment évolué mais s'articulent toujours autour de la caractérisation et de la compréhension des processus associés aux transferts d'eau dans la zone critique, avec le souci de développer des modèles qui décrivent, à différentes échelles, les hydro-géo-systèmes qui la constituent. Le département H2GS2 est également resté acteur dans le développement d'outils et d'applications pour imager et comprendre le sous-sol et évaluer l'impact des activités humaines, passées et futures, sur la zone critique.

H2GS2 est naturellement organisé en plus petits groupes de recherche en « hydrologie et hydrogéologie » et « géophysique ». Ses membres travaillent sur le changement climatique, notamment du point de vue hydrologique ; sur l'influence de l'eau souterraine et de son exploitation sur les transferts (d'eau et de chaleur) aux échelles globale et régionale ; sur l'impact de l'urbanisation et de l'exploitation des ressources sur le

fonctionnement hydrologique des bassins versants (y compris sur les crues et les nappes alluviales) ; sur l'hydrogéologie de sites contaminés ; sur les systèmes karstiques ; avec le développement d'approches hydrogéophysiques et pour l'étude des processus complexes dans les milieux poreux ; et sur les développements méthodologiques en géophysique pour des applications aux géosciences en général.

Au cours de la dernière décennie, les moyens techniques de modélisation, technologies de mesures et capteurs disponibles ainsi que les méthodes de gestion et traitements de données ont connu des avancées très significatives. Les politiques scientifiques d'observation et d'étude des sites naturels sont portées par de grands programmes de financements et de structurations aux échelles nationales et internationales. Les institutions, en raison de l'urgence climatique, encouragent par ailleurs à mettre l'accent sur les implications sociétales et environnementales des recherches dans les domaines d'intérêt du département. Tous ces aspects se reflètent dans les évolutions thématiques et structurelles d'H2GS2 ces dernières années (sans compter l'impact de l'arrivée de jeunes CR et MCF aux thématiques innovantes).

De fait, les membres d'H2GS2 se confrontent à des problèmes de plus en plus complexes et multiformes, que ce bilan présentera à travers les grands thèmes suivants (dont les « colorations sont plutôt « Hydro » pour les thèmes 1 et 2, plutôt « Géophy » pour les thèmes 5 et 6 et plutôt « Mixtes » pour les thèmes 3 et 4 :

- | | |
|---|-------|
| 1. Modèles et processus : continuum eaux souterraines - eau de surface – atmosphère | (H) |
| 2. Impacts anthropiques sur les hydrosystèmes et le climat / Trajectoires | (H) |
| 3. Caractérisation de la zone critique | (H-G) |
| 4. Hydrogéophysique et processus | (G-H) |
| 5. Méthodes et imageries géophysiques | (G) |
| 6. Développements expérimentaux et instrumentaux en géophysique | (G) |

1. Modèles et processus : continuum eaux souterraines - eau de surface - atmosphère

Nous développons et appliquons au sein de H2GS2 des modélisations diversifiées, que ce soit en termes d'échelle spatiale (de l'échelle globale pour la modélisation du climat à celle des bassins versants, petits ou grands, jusqu'à des applications plus locales) ou de représentation des processus physiques (modèles à bases physiques ou plus conceptuels). Cette expérience nous permet d'aborder un large panel de questions scientifiques sur la représentation des flux d'eau au sein de la zone critique, avec un focus marqué durant ce quinquennat sur les processus aux interfaces surface / souterrain et surface / atmosphère. H2GS2 a fortement contribué aux nouveaux développements du modèle ORCHIDEE de l'IPSL pour comprendre et quantifier les processus à ces interfaces.

1a. L'évapotranspiration comme variable clé des interactions surface / atmosphère

L'évapotranspiration renvoie environ $\frac{2}{3}$ des précipitations (à l'échelle globale et française) à l'atmosphère sous forme vapeur. Ce processus contraint donc fortement les précipitations "efficaces", c'est-à-dire celles qui alimentent les flux d'eau liquide dans les bassins versants donc les ressources en eau. Mais il existe une grande diversité de représentation de ce processus, qui permet de coupler le bilan d'eau et d'énergie des surfaces continentales. Cette diversité est une source d'incertitude importante dans les estimations des ressources en eau, en contexte historique ou futur.

Le développement d'approches de modélisation diversifiées au sein de H2GS2 permet de mettre en évidence l'impact des choix de modélisation sur les simulations prospectives. En particulier, la représentation de l'évapotranspiration dans les modèles hydrologiques peut se faire par une résolution du bilan d'énergie (c'est le cas dans ORCHIDEE) ou par le calcul intermédiaire d'une évapotranspiration potentielle (ETP, comme dans le modèle conceptuel GR4J). Quelle que soit la formule d'ETP utilisée, il existe une divergence importante entre une modélisation ayant recours au concept d'ETP et les modèles ayant recours à un calcul de bilan d'énergie, ce qui pose question sur l'utilisation de ce concept en contexte non-stationnaire et nécessite probablement des ajustements pour tenir compte de rétroactions éventuelles, telles que le rôle inhibiteur de la teneur en CO₂ atmosphérique sur la transpiration (Lemaitre-Basset et al., 2022a,b).

Dans le modèle ORCHIDEE, l'évapotranspiration dépend explicitement du bilan d'énergie, de l'humidité du sol, du type de sol et de végétation, ainsi que des propriétés de la couche limite atmosphérique. Dans le cadre de la préparation du modèle de climat de l'IPSL (Boucher et al., 2020) pour le programme CMIP6 qui a alimenté le 6ème rapport du GIEC, nous avons pu fixer certains paramètres du modèle ORCHIDEE pour réduire les biais de l'évapotranspiration simulée par rapport à des produits combinant mesures spatiales, in situ

et techniques d'interpolation (Cheruy et al., 2020 ; Mizuochi et al., 2021), avec un fort accent sur le rôle des propriétés des sols (Grippa et al., 2017; Guimberteau et al., 2018 ; Vereecken et al., 2019 ; Tafasca et al., 2020), qui interviennent aussi dans le maintien de la végétation face aux changements climatiques à diverses échelles de temps (Chen et al., 2020 ; Al-Yaari et al., 2020; MacBean et al., 2020 ; Xi et al., 2022b). Nous avons aussi pu montrer l'accroissement net de l'évapotranspiration dans les zones fortement irriguées, mais avec des répercussions modérées sur les températures et précipitations lors des dernières décennies (Al-Yaari et al., 2019 ; Al-Yaari et al., 2022). En parallèle, un gros travail a porté sur l'influence des eaux souterraines sur l'évapotranspiration, les bilans hydriques et les débits (cf. partie suivante 1.b).

Dans les zones faiblement documentées et instrumentées (i.e. Madagascar, Indonésie), l'équipe H2GS2 cherche à développer des approches simplifiées pour utiliser, analyser et améliorer des produits issus de la télédétection pour estimer l'évapotranspiration (thèse en cours R. Alimohammad Nejad, 2022-2025) ou les précipitations (Dumont et al. 2022). Un travail important étant donné le développement des retenues artificielles vise enfin à comparer différentes manières de calculer l'évaporation des plans d'eau, à partir d'ETP ou par bilan d'énergie (publication en cours dans le cas des gravières).

1b. Travaux sur l'interface surface / souterrain

Le couplage entre la surface et le milieu souterrain est abordé de différentes façons au sein de l'équipe H2GS2 en fonction des questions scientifiques.

Plusieurs directions ont été explorées pour mieux décrire ce continuum entre eaux de surface et eaux souterraines dans le modèle ORCHIDEE. Nous avons d'abord intégré une description à beaucoup plus haute résolution de la topographie (de 0.5° à 2 km) pour contraindre le réseau hydrographique et la modélisation des débits (Schneider et al., 2017; Zhao et al., 2017; Nguyen-Quang et al., 2018). Sur cette base, de gros efforts ont porté sur la représentation des écoulements souterrains, avec un cadre de collaborations très riche au niveau national et international (Gleeson et al., 2021). Nous avons montré qu'on dégradait souvent la dynamique des débits en décrivant les aquifères profonds avec des temps de résidence très longs (thèse d'Ana Schneider, 2017 ; Rashid et al., 2019), et que les nappes superficielles permettaient d'augmenter l'évapotranspiration avec des effets locaux sur le climat simulé (Wang et al., 2018 ; Lan et al., 2022). Ceci nous a amené à nous focaliser sur la description des écoulements souterrains le long des versants, qui alimentent une humidité et une évapotranspiration accrues dans les fonds de vallée, et permettent d'introduire une dynamique de montée en crue rapide à partir des zones saturées (Tootchi, 2019 ; Tootchi et al., 2019 ; Arboleda et al., 2022) avec des applications pour la description des zones humides et des tourbières (Qui et al., 2019 ; Xi et al., 2022b).

Les interactions entre eaux de surface et eaux souterraines ont aussi été abordées par l'analyse du fonctionnement des cours intermittents : revue des travaux liés à OZCAR (Fovet et al., 2021) ; étude long-terme au Burkina Faso (Belemtougri et al., 2021) et de leur impact sur la recharge concentrée des eaux souterraines en zone de socle au Burkina sous climat aride (Rusagara et al., 2022). Un autre cas particulier des interactions entre eaux de surface et eau souterraines est offert par les zones de pergélisols, où nous combinons modélisation, observations et expérimentations en laboratoire (thèse en cours de Haoliang Luo) pour comprendre les dynamiques induites par la fonte de ces milieux (Grenier et al., 2018; Rivière et al., 2019; Sergeant et al., 2021).

Par ailleurs, des observations directes (intensité, piézométrie, qualité) de la recharge des aquifères sont aussi menées par l'équipe directement sur le terrain dans différents contextes : dans la craie du bassin parisien au niveau de la carrière de St Martin le Noeud (Valdès et al., 2023 ; **PF2**) ; dans les roches de socle de la partie centrale du Tchad (thèse de H. Nouradine) ou du Nord du Burkina Faso (Rusagara et al., 2022) ; à partir d'eaux usées traitées dans le Cotentin dans le cadre de travaux sur la recharge maîtrisée (thèse Q. Guillemoto 2022, Guillemoto et al. 2022, 2023).

1c. Apport de la télédétection à l'étude des hydrosystèmes

Dans le département H2GS2 comme ailleurs, le recours à des produits de télédétection est de plus en plus fréquent, d'abord pour définir les conditions aux limites des modèles hydrologiques (topographie, végétation, surfaces en eau et zones humides, e.g. Schneider et al., 2017; Tootchi et al., 2019; Boucher et al., 2020 à l'échelle globale, ou thèse de Gurpreet Dass sur la plaine alluviale de la Bassée à l'amont de Paris), mais aussi comme élément de comparaison aux simulations de nos modèles. Les produits de télédétection utilisés dans ce contexte sont très diversifiés : humidité du sol selon le satellite SMOS (Al-Yaari et al., 2019; Mizuochi et al.,

2021), fraction enneigée par les satellites Terra et Aqua pour mieux contraindre l'évolution du manteau neigeux dans les modèles hydrologiques (Riboust et al., 2019), hauteurs d'eau (dans la perspective des futures données SWOT) pour améliorer la simulation des débits et surfaces inondées dans les modèles hydrauliques et hydrologiques (Ottlé et al., 2020; Mahdade et al., 2020; Le Moine & Mahdade, 2021), estimations d'évapotranspiration ou de précipitation pour estimer les ressources en eau souterraines dans des zones avec peu d'instrumentations au sol (Rashid et al., 2019 ; Dumont et al., 2022 ; thèse en cours de Rojin Alimohammad Mohammad).

2. Impacts anthropiques sur les hydrosystèmes et le climat / Trajectoires

L'étude des impacts hydrologiques des pressions anthropiques reste un thème très structurant au sein de H2GS2, en lien fort avec le contexte opérationnel, en amont des réflexions sur l'adaptation au changement climatique. Ces travaux s'appuient largement sur la modélisation et guident pour beaucoup les développements menés dans le Thème 1. Les pressions considérées dans nos études sont de différentes natures, et elles impactent soit la quantité de la ressource en eau disponible (dans les rivières et les aquifères), soit la qualité de cette ressource, soit les deux.

Un premier axe, désormais classique, porte sur l'évaluation des impacts hydrologiques du changement climatique, qu'il s'agisse de l'évolution au cours du 21ème siècle des grands aquifères actuellement fortement exploités (Wu et al., 2020, **PF8**), ou de celle des débits des rivières arctiques en lien avec la fonte du pergélisol (Sergeant et al., 2021). Nous participons aussi au projet national Explore2 visant à mettre à jour les projections hydrologiques sur la France jusqu'en 2100, en utilisant les derniers développements du modèle ORCHIDEE de l'IPSL.

Les innovations que nous avons portées dans le cadre du changement climatique sont multiples. Elles concernent par exemple l'intégration des stratégies d'adaptation des gestionnaires dans le bassin de la Moselle (thèse de Thibault Lemaitre-Basset). Nous avons aussi caractérisé la manière dont les trajectoires du changement climatique local sont modulées par les interactions entre eaux souterraines et atmosphère, notamment en atténuant les baisses d'évapotranspiration et le réchauffement local dans les zones où le changement climatique amène une baisse des précipitations (Arboleda et al., 2022). Un autre point important concerne l'attribution des changements climatiques passés, qui nécessite de combiner tendances observées et simulations "contre-factorielles" (permettant de quantifier l'influence de certains facteurs en les activant ou les désactivant). Dans le cadre du projet CMIP6, nous avons par exemple démontré que l'intensification des sécheresses pendant le 20ème siècle pouvait être attribuée à l'augmentation du forçage radiatif par les activités humaines (Padron et al., 2020, cité dans les 6èmes rapports du GIEC).

Des travaux importants ont aussi porté sur l'étude de la réponse des bassins versants et des surfaces continentales à certaines activités humaines impactant les bilans d'eau. Il s'agit notamment de l'imperméabilisation des surfaces, via la thèse de Mohamed Saadi sur l'impact de l'urbanisation et la mise en place d'une modélisation explicite des zones urbanisées dans les modèles hydrologiques GR (Saadi et al., 2019, 2020a,b, 2021), et la thèse en cours de Morgane Lalonde sur l'impact des zones urbaines sur les précipitations, passant par l'intégration d'un module urbain dans le modèle ORCHIDEE. Une autre pression anthropique dont nous étudions les impacts hydrologiques et climatiques est l'irrigation : l'identification des impacts passés (Al-Yaari et al., 2019; Al-Yaari et al., 2022) nous amène à mieux décrire cette pratique dans ORCHIDEE (thèse de Pedro Arboleda, article soumis à GMD), ce qui permettra prochainement d'estimer son évolution sous changement climatique dans le cadre du projet international BLUEGEM (Biosphere and Land Use Exchanges with Groundwater and soils in Earth system Models). Ce projet finance aussi la thèse de Julie Reineix, qui s'appuie sur un modèle agro-économique développé à l'INRAe pour scénariser l'évolution future des surfaces irriguées en France.

Mais l'anthropisation s'exprime aussi par l'exploitation des ressources naturelles, en eau et matières minérales, dont l'impact est au cœur des préoccupations du département H2GS2. Par exemple, des scénarios d'exploitation des ressources en eau ont pu être proposés via la modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un bassin versant peu instrumenté en milieu volcanique (Dumont et al., 2023). L'exploitation des matières minérales et leur impact quantitatif et qualitatif sur les écoulements naturels est également un sujet de recherche de notre équipe : impact hydrodynamique de l'exploitation de graviers dans la plaine de la Bassée (thèse de Gurpreet Dass en cours ; Jost et al. 2023) ; impact sur l'environnement d'effluents de résidus miniers stockés sous différentes configurations (thèse de Pierre L'Hermite en cours, Plagnes et al. 2017 ; Ouedraogo et al. 2021) et évaluation de l'évolution à long terme de ces impacts sous

changement climatique (L'Hermitte et al., 2022), puisque finalement, il y a superposition des pressions directes et de celles qui découlent du réchauffement climatique.

3. Caractérisation de la zone critique

La zone critique (ZC) est le compartiment allant du sommet de la canopée à la base des aquifères. Les travaux de caractérisation de la ZC menés à METIS (description de la géométrie et des propriétés du compartiment souterrain) passent par un travail multidisciplinaire basé sur deux piliers : l'hydrogéologie et la géophysique. Plusieurs environnements et territoires sont explorés car cette caractérisation qui est site-dépendante. Le département H2GS2 est un acteur majeur dans l'étude de cette ZC (impliqué dans les SNO Karst et SNO H+ de l'IR OZCAR). L'étude des écosystèmes forestiers est un nouvel axe de recherche qui devient une spécificité du département et reste unique en France. Des travaux utilisant la géophysique (Carrière et al. 2020a, Carrière et al. 2021), l'isotopie (Carrière et al. 2020b, c) et l'association géophysique-isotopie (Carrière et al. 2020d) ont servi de preuve de concept pour montrer l'intérêt de ces recherches. La thèse en cours de Bertille Loiseau (S. Carrière, N. Martin-St Paul (URFM), D. Jougnot) permet d'aller plus loin dans cette dynamique en réalisant des suivis géophysiques sur plusieurs sites OZCAR et ICOS. Plusieurs collaborations sont en cours avec des laboratoires d'écologie forestière (URFM, UMR CEFE, UMR ESE, UMR PIAF, UMR SILVA, UMR ECO&SOL). Le dépôt de l'ANR TAW-Tree avec la plupart de ces partenaires va renforcer cette dynamique pour les prochaines années.

L'étude du transfert de l'eau et des solutés dans la ZNS est un thème transverse de l'UMR METIS, notamment les travaux menés sur la carrière souterraine de craie de Saint-Martin-le-Noeud (cf. **PF2** et Thèmes transverses) pour décrire la structure du dôme topographique et hydrogéologique dans lequel la carrière est localisée. La géophysique a permis d'imager par cartographie d'induction électromagnétique basse fréquence (EMI), par tomographie de résistivité électrique et par tomographie sismique (ondes P et ondes S) en renseignant sur les variations d'épaisseur de la couverture superficielle limono-argileuse, sur la présence de digitation à l'interface entre cette couverture et les couches de craie, sur le pendage et les différentes couches de craie. L'étude de l'hydrodynamique et de la qualité des eaux de percolation (sortie de la ZNS) et des lacs souterrains (la nappe) a permis de relier la grande variabilité des processus de transfert de l'eau et des solutés dans la zone non saturée de la craie aux caractéristiques de la ZNS, qui montre des vitesses de transfert des contaminants globalement très faibles (de l'ordre de 1m/an) (Chen et al. 2019a). Le couplage des approches géophysiques, biogéochimiques et hydrogéologiques a notamment pu mettre en évidence le rôle de la couche d'argiles à silex recouvrant la craie: la présence d'argiles modifie les processus d'infiltration permettant d'une part davantage de dégradation des pesticides en surface, et d'autre part des vitesses de transfert dans la craie plus importantes (Valdes et al. 2023)

La description de plusieurs hydrosystèmes volcaniques par tomographie de résistivité électrique en Indonésie sur les flancs des volcans andésitiques respectivement du Salak et du Pangrango permet d'identifier des fonctionnements différents des sites artésiens respectivement de Kubang et de Lido. Les profils de tomographie électrique imagent des structures subhorizontales composées de couches conductrices qui correspondent à des lahars et des formations détritiques altérées, recouvrant un substratum résistant correspondant à des brèches volcaniques. Les deux systèmes sont différents : sur celui de Kubang, le système s'enfonce vers l'amont le protégeant des activités humaines de surface, tandis que la morphologie de l'érosion du site de Lido induit de potentielles connexions de l'aquifère avec la surface (Dumont et al., 2023). Ces travaux ont été menés dans le cadre du post-doctorat de M. Dumont et d'un projet PHC NUSANTARA.

La thèse de D. D. Soro réalisée en co-tutelle avec l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) à Ouagadougou (Burkina Faso) avait pour objet de proposer un modèle conceptuel hydrogéologique en milieu de socle fracturé soudano-sahélien (en étudiant le site expérimental de Sanon). La première étape a consisté à caractériser la géométrie et la structure du système aquifère à l'aide de forages et de données électriques (diagraphie et tomographie de surface). Ensuite, les propriétés hydrodynamiques ont été déterminées en combinant essais de pompage et sondages de résonance magnétique des protons. Les résultats indiquent que le profil d'altération présente trois couches : la saprolite, l'horizon fissuré et la roche saine en allant de la surface en profondeur (Soro et al., 2017). La thèse de Nouradine Haroun, en cours, complète ces travaux en proposant une méthodologie couplant la géologie, l'hydrogéophysique (tomographie de résistivité électrique), la géochimie et la géomorphologie pour guider l'implantation des forages d'eau potable dans la zone critique des roches de socle. L'étude est focalisée sur la partie centrale du Tchad dans laquelle l'accès à l'eau potable est très limité et bien inférieur aux recommandations de l'OMS. Dans un cadre différent, la thèse d'Elijah Nkitnam, en cours, vise à caractériser l'aquifère du site archéologique

gallo-romain des Vaux-de-la-Celle (Genainville, Val d'Oise), sur lequel les variations du niveau de la nappe phréatique présentent des risques pour la conservation des bâtis. Les chroniques piézométriques ont été utilisées pour caractériser les propriétés hydrauliques et mécaniques de l'aquifère de surface.

4. Hydrogéophysique et processus

4a. Articulation entre données hydrogéologiques et géophysiques

Au cours de la dernière décennie, à travers nos implications dans les grands programmes et actions de recherche tels l'Equipex CRITEX et le PIREN-Seine et les réseaux d'observation tels le SNO H+ et l'IR OZCAR, nous avons fait de notre mieux pour développer des méthodes alternatives afin d'imager les hétérogénéités de la ZC, de décrire la dynamique de ses hydrosystèmes et d'ajouter des techniques sismiques à la boîte à outils de l'hydrogéophysique (Pasquet & Bodet 2017 et [codes associés](#)). Avec l'émergence des infrastructures d'observation à long terme dans ce domaine, ces outils géophysiques récemment développés par la communauté tendent à être considérés comme des méthodes de caractérisation géophysique de pointe principalement déployées pour augmenter les bases de données des observatoires et des réseaux (la sismique CRITEX, mise en avant au précédent contrat, a depuis été mise en œuvre sur plus de 15 sites/bassin versants).

Mais un problème majeur est que les résultats géophysiques ne sont pour la plupart que des ensembles de paramètres, en d'autres termes des "modèles", déduits d'ensembles de données éparses et de problèmes mal posés. Ils ne peuvent certainement pas être considérés comme des données par les observatoires. Afin de mieux transporter l'information des données vers des modèles qui pourraient être exploités en toute sécurité par des non-géophysiciens, nous devons : augmenter l'étendue de nos mesures ; optimiser nos configurations d'acquisition par rapport à la cible d'intérêt ; augmenter considérablement nos capacités d'échantillonnage spatial et temporel ; automatiser nos flux de traitement fastidieux ; et améliorer, voire réviser complètement, nos outils d'inversion (cf. **PF6** thèse de M. Dangeard, 2019 ; **PF5**, thèse de L.A. Blazevic, 2020 dans le cadre de l'ITN ENIGMA). Nos travaux de terrain (p.ex. Blazevic et al., 2020 ; Dangeard et al., 2021) montrent comment une interprétation approfondie des modèles géophysiques peut fournir des informations préalables précieuses sur la distribution des hydrofaciès et calibrer le domaine de modélisation hydrogéologique. Nous soulevons actuellement (thèse de R. Sanchez Gonzalez en coop. avec MINES PARIS) la question de la propagation de l'incertitude des données géophysiques vers le modèle hydrogéologique et suggérons en (coop. avec UNIL) l'utilisation d'une pétrophysique alternative (Solazzi et al., 2021) pour mieux interpréter les données collectées dans la zone partiellement saturée.

4b. De l'hydrogéophysique aux processus de la ZNS

Un des verrous scientifiques pour l'utilisation quantitative des mesures géophysiques dans la zone critique est lié à leur nature indirecte. En effet, la propriété physique qu'on mesure n'est pas directement la propriété d'intérêt pour la caractérisation de la zone critique. Ce lien doit être fait grâce à des modèles physiques appelés « pétrophysiques ». H2GS2 participe très activement aux développements pétrophysiques dans les milieux hétérogènes (i.e., sols avec agrégats, roches fracturées), notamment à travers une approche de changement d'échelle innovante et suffisamment flexibles pour prendre en compte différents types d'hétérogénéités (la distribution de taille de pores, la distribution de l'eau dans ces pores, le degré de fracturation) et décrire un ensemble de paramètres de transport du milieu poreux : e.g, perméabilité (Soldi et al., 2017, 2022), conductivité électrique (Thanh et al., 2019, 2020a), couplage électrocinétique (Guarracino et Jougnot, 2018, 2022; Jougnot et Solazzi, 2021; Vinogradov et al., 2021; Solazzi et al., 2023), électroosmose (Thanh et al., 2020b).

H2GS2 est pionnier dans le développement de méthodes hydrogéophysiques pour le suivi de processus géochimiques, tels que les phénomènes de transfert réactif en milieu poreux carbonaté. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de F. Rembert et le projet INSU EC2CO STARTREK (Système pétrophysique de caractérisation du Transport Réactif en milieu Karstique) porté par L. Luquot (Géosciences Montpellier) et pour lequel H2GS2 assurait la partie suivi géophysique. La thèse de F. Rembert à METIS portait sur le développement de deux méthodes géo-électriques pour le suivi de phénomènes de dissolution/précipitations : la polarisation spontanée et la polarisation provoquées (Rembert et al., 2020; 2022). Les développements expérimentaux initiés à H2GS2 ont été transposés à Géosciences Montpellier afin de le coupler aux dispositifs de Linda Luquot (Rembert et al. 2023).

Le projet MITI (Mission for Interdisciplinary and Transversal Initiatives) 80 | PRIME BIOMASS (BIOgeophysical characterization of Microbial Activity in Soils; commencé en 2022 pour 3 ans) a pour objectif d'utiliser une méthode classiquement utilisée à H2GS2 pour caractériser le domaine d'activité des micro-organismes du sol. En effet, la minéralisation de la matière organique du sol est limitée par la diffusion (Nunan, 2017). La conductivité électrique, qui suit aussi les lois physiques de la diffusion, permet de quantifier la connectivité et de la tortuosité de la phase fluide dans le réseau poral et permettre d'estimer un coefficient de diffusion effectif (Revil et Jougnot, 2008). Ce volume aqueux, connecté à un organisme décomposeur, peut être vu comme le « volume actif » du sol dans lequel certaines molécules organiques peuvent librement diffuser.

5. Méthodes et Imageries Géophysiques

5a. Relations entre géophysique, géotechniques et risques

H2GS2 propose également des développements méthodologiques pour le suivi des propriétés mécaniques des sols et ouvrages en terre. Le projet Odyssey (en coop. avec Univ. Rouen et l'Air Force Research Lab. aux US) propose par exemple d'identifier l'ensemble optimal de méthodes géophysiques pour estimer la capacité portante du sol. Afin d'étudier la réponse géophysique à différents états de compactage du sol, un site d'essai grandeur nature a été conçu en utilisant comme matériau de construction un limon argileux normalisé. Le site d'essai, basé au CEREMA de Rouen et qui est également utile à nos formations, est un remblai du limon susmentionné à teneur en eau constante d'une taille de 5 m x 29 m et d'une épaisseur d'environ 0,75 m comprenant trois zones avec différents niveaux de compactage. Les résultats obtenus permettent d'identifier un lien significatif entre les mesures obtenues par le pénétromètre dynamique à cône (DCP) et les grandeurs géophysiques mesurées telles que les propriétés électriques, sismiques et électromagnétiques (post doctorat d'Ao Wang avec un article soumis en février 2023). Ces résultats permettent de déterminer les protocoles appropriés à la cartographie à la volée des propriétés de portance (en intégrant à terme de l'équipement géophysique à des vecteurs autonomes terrestres ou aériens), à partir de mesures géophysiques dans des contextes géologiques complexes et où la proportion d'argile dans le sol est importante.

Dans le même esprit, le département coopère depuis plus de 10 ans avec SNCF Réseau pour la mise en place de méthodologies économiques, non polluantes et rapides de caractérisation de l'état mécanique du sous-sol (cf. rapport interne SNCF Réseau par Bodet et al., 2017 ou manuscrit d'HDR de Bodet, 2019). Les techniques géotechniques traditionnelles utilisées en ingénierie ferroviaire restent en effet coûteuses et ne sont pas toujours parfaitement adaptées à un échantillonnage régulier des propriétés mécaniques des remblais ferroviaires (RE). Il est donc nécessaire de développer et de déployer des outils géophysiques (donc non-destructifs), permettant une estimation quasi continue des caractéristiques mécaniques des RE sur des distances importantes. Dans ce but, des acquisitions sismiques à haute résolution et à petite échelle sont réalisées sur des sites d'essai bien contraints le long de lignes à grande vitesse ou de ligne classique. Les données extraites, en utilisant la technique d'analyse des ondes sismiques de surface, ont une forte variation spatiale des vitesses de propagation là où des efforts de maintenance anormaux. La mise au point d'une inversion bayésienne de ces données a permis de quantifier ces variations en termes de modules de cisaillement, très bien corrélés avec les tests de laboratoire (thèse CIFRE d'A. Burzawa, 2022-2025). Des acquisitions diachroniques avec des configurations strictement similaires ont permis de montrer la répétabilité de la méthode, qui va être déployée en coopération avec des industriels spécialistes de la géophysique ferroviaire. Dans le même esprit, ces travaux sont en parallèle abordés par la technique de sismique dite « passive », en montrant que le signal « train » permettra de quantifier les variations de propriétés mécaniques du sous-sol liées à des variations de teneur en eau et/ou l'évolution de fontis. Ces aspects sont traités dans le cadre d'une deuxième thèse CIFRE (J. Cunha Teixeira, coop. MINES PARIS, 2022-2025) en préparation de projet à plus grande échelle (i.e. niveau européen) visant l'optimisation et l'amélioration des transports ferroviaires compte tenu du contexte climatique.

5b. Développements méthodologiques et modélisation

Ces efforts en matière d'application des approches géophysique à la prévention des risques sont dans la lignée de ceux conduits durant la thèse CIFRE EDF de K. Sabor (2017-2020) proposant l'étude de l'intégrité des digues à travers des développements numériques en électrique et sismique ainsi que de l'analyse de données par « clustering » (Sabor et al., 2020). Du point de vue de la modélisation et de l'interprétation de données par méthodes d'apprentissage également, la thèse de J. Cardenas Chapelin (coop. LIP6, UMISCO, Université Cadi Ayyad, à Marrakech, Maroc) présente la caractérisation d'anomalies magnétiques par des réseaux de neurones convolutifs, et l'application d'outils de visualisation pour comprendre et valider leurs prédictions (en

contexte de risque pyrotechnique). H2GS2 reste également compétitif en modélisation numérique dans les milieux poreux comme par exemple à l'échelle du pore avec des études de l'impact de la bioporosité avec le département Biogéochimie (K. Quenea) et en coopération avec C. Davy qui va rejoindre nos équipes ou bien sur les cristaux de sels (conservation des monuments : en coop avec Univ. Cergy), ou encore sur la propagation d'ondes (Nguyen et al., 2021). La plus grande échelle et les milieux fracturés sont également étudiés (ou plus précisément à l'échelle de Darcy du milieu considéré) avec les transports de traceurs à l'atmosphère après un essai nucléaire (Pazdniakou et al., 2022) et l'analyse de la zone endommagée autour d'une galerie creusée dans le Callovo-oxfordien (en cours de rédaction).

Les travaux de modélisation sont traditionnellement développés par H2GS2 dans un souci d'aide à la compréhension des données mesurées sur le terrain. De récents travaux ont par exemple proposé la prise en compte de la polarisation électrique dans l'interprétation des mesures réalisées en méthodes d'induction électromagnétique et en électrostatique. Alors que pour cette seconde méthode la prise en compte de la permittivité avait eu lieu d'emblée puisqu'une partie des mesures se faisait sur des milieux de résistivité élevée et que cette deuxième propriété ne pouvait être ignorée, l'interprétation des mesures réalisées à Bahreïn a montré qu'il fallait aussi la prendre en compte avec les EMI. Nous avons donc été conduits à mener de front trois démarches : (i) interpréter et/ou réinterpréter les prospections EMI, par exemple (Simon et al., 2019, Finco et al., in press), (ii) synthétiser l'information existant dans la littérature (Tabbagh et al., 2021), (iii) faire des mesures sur échantillon en laboratoire dont les premières, sur les calcaires tertiaires du bassin parisien (Souffaché et Tabbagh, 2021 et 2022 in press), ont pu être publiées.

6. Développements expérimentaux et instrumentaux en géophysique

La mesure de la conductivité électrique par contact galvanique (électrodes plantées dans le sol) est complexe, voire impossible à mettre en œuvre en milieu urbain. La méthode électrostatique par contact capacitif permet de réaliser des mesures en faisant glisser un tapis sur le macadam en utilisant des plaques métalliques comme pôles électriques. La mesure de la conductivité électrique du sous-sol permet (selon le contraste) de distinguer par exemple des structures anthropiques électriquement résistantes d'un sol environnant plus conducteur (par exemple limoneux et/ou argileux). La mesure des propriétés électriques peut également être utilisée pour cartographier l'hétérogénéité des matériaux sous la chaussée afin de guider le réaménagement futur. Plusieurs versions de prototypes d'acquisition ont été développées à H2GS2 pour différentes profondeurs d'investigation et pour des prospections principalement archéologiques en milieu urbain (Benech et al., 2017 ; Blary et al., 2017). Récemment, la méthode électrostatique a également été utilisée pour un problème de réaménagement en Suède (Reijkjaer et al., 2021). D'autres types d'applications de la prospection électrostatique sont envisagés dans le domaine géotechnique pour par exemple corrélérer les variations de résistivité électrique et de permittivité diélectrique avec les variations de compacité/capacité portante du sol (1-2 premiers mètres, projet ODYSSEY mentionné supra). Des applications dans le domaine de l'hydrogéologie pour une meilleure identification des formations superficielles argileuses et non argileuses (grâce à la permittivité diélectrique), et donc des zones d'infiltration préférentielles s'inscrivent également dans le cadre des travaux du PIREN Seine.

H2GS2 a par ailleurs développé « hexapole », un prototype adapté aux matériaux de construction, d'abord appliqué aux pierres de construction des monuments historiques d'Ile de France. Plus récemment (fin 2020), en collaboration avec l'ISTeP, l'utilisation du dispositif a été testée sur des pierres du sanctuaire de Delphes (Grèce) afin de fournir des informations complémentaires pour aider à la reconstitution des étapes de construction et de reconstruction du site antique en corrélant avec des mesures dans des carrières proches. En archéologie / gestion du patrimoine ces travaux sont appliqués à la reconstitution de l'histoire de la construction des sites anciens, ou à l'identification des éléments les plus altérés (par exemple, fractures, infiltrations, feu). En géotechnique, ces outils peuvent permettre le suivi de l'altération et du vieillissement du béton. En pédologie, il est possible de proposer des mesures sur des sections verticales (profil pédologique en fosse).

Dans le cadre de l'ANR EXCITING (porté par l'Université de Strasbourg et co-porté par H2GS2), la thèse d'Aida Mendieta a mené à la création d'un dispositif expérimental innovant pour une bonne répétabilité des mesures Polarisation Provoquée Spectrale sur argiles et a permis l'acquisition d'un jeu de données inédit sur des échantillons argileux homogènes (Mendieta et al. 2021) et présentant des hétérogénéités à l'échelle mésoscopique (i.e., inférieur à la résolution de la mesure, Mendieta et al., 2023).

Dans le cadre du projet Geoprocess (Projet Emergence, Ville de Paris obtenu en 2017), nous avons mis en place un suivi de la dégradation de HAP par méthode optique et géophysique (susceptibilité magnétique). Nous avons pu mettre en avant la formation de particule de magnétite lors de la dégradation biotique de phénanthrène en milieu anoxique. Le suivi par caméra numérique de la décoloration apporte des informations qualitatives sur la réaction chimique in vitro. En parallèle, le développement d'un prototype de mesure de la susceptibilité magnétique sur des bioréacteurs de volumes décimétrique permet de suivre des processus équivalents à ceux mesurés sur le terrain, c'est-à-dire la bio-précipitation de minéraux magnétiques par les bactéries qui dégradent les contaminants. Le prototype a été fabriqué dans l'atelier d'instrumentation géophysique. Son fonctionnement et le principe de la chaîne de mesure ont été validés sur des matériaux homogènes. La prochaine étape est de finaliser l'étude de sensibilité du capteur créé et de passer de la preuve de concept à une version prototype utilisable en routine. Ce projet sera finalisé par deux papiers en cours de rédaction.

Bilan des projets transversaux

1. Chantiers partagés

L'observatoire de Saint-Martin-le Nœud (**PF2**), dont D. Valdés est responsable, est le principal des "chantiers partagés" de l'UMR METIS. Cette ancienne carrière souterraine située en Picardie, observatoire du SNO Karst (Gaillardet et al. 2018 ; Jourde et al. 2018), est équipée et suivie depuis 2012 pour l'étude des transferts de l'eau et des contaminants agricoles dans la zone non saturée de l'aquifère de la craie (qui contient la nappe de la craie, ressource en eau majeure sur le Bassin Parisien). Une dizaine de chercheurs de METIS des deux départements y sont impliqués, avec le précieux soutien des équipes techniques de terrain et de laboratoire, des doctorantes (Chen, 2018) et stagiaires de Master : les géophysiciens travaillent sur la caractérisation de la zone non saturée, les biogéochimistes sur la caractérisation des processus de transferts et de dégradation des pesticides, et les hydrogéologues sur le transfert de l'eau et les processus d'infiltration.

Cette approche réellement pluridisciplinaire et inter-département a permis plusieurs avancées importantes lors du précédent contrat, en collaboration forte avec l'INERIS, le CEREMA et l'UMR GEOPS de Paris Saclay : 1) l'estimation des différentes vitesses de transfert (matrice/fissures) dans la zone non saturée de la craie (Chen et al. 2019a), 2) les processus de transferts et de dégradation de l'atrazine : pesticide majeur de la nappe de la craie (Chen et al. 2019b), 3) le rôle des formations superficielles et en particulier des argiles à silex sur l'infiltration, et processus de transfert de l'eau et des solutés (Valdes et al. 2023). Les collaborations entre départements initiées autour de ce chantier ont permis par la suite de travailler sur les problématiques d'infiltration d'eaux usées traitées (collaboration avec le BRGM, Guillemoto et al., 2022) et de développer le projet COMAIRS déposé au PEPR One Water et fortement porté par notre unité.

Les membres des deux départements de l'UMR sont également très fortement impliqués dans l'observatoire Oracle et le bassin de l'Orgeval (<https://gisoracle.inrae.fr/>). Cet observatoire est piloté par INRAE et reconnu par l'OSU Ecce Terra, et fait l'objet de nombreux travaux dans le cadre du programme PIREN-Seine. Les membres de l'unité y sont très actifs et porteurs sur de nombreuses thématiques dans les domaines de la biogéochimie et de l'hydrogéophysique. Sur ce bassin versant se trouvent des sites importants du réseau ABAC, porté par notre unité, qui compare l'agriculture biologique et l'agriculture conventionnelle, ce qui a permis d'évaluer les exportations de systèmes agricoles via l'infiltration et le drainage (Garnier et al., 2022, Mander et al., 2021, Jeliaskov et al. 2019). Ils ont également contribué à intégrer les eaux souterraines et les eaux de surface dans l'évaluation de l'érosion chimique (Tunqui-Neira et al., 2020, 2021), en étendant la base de données des concentrations en majeurs dans le bassin, et exploitant également les données du RiverLab installé sur ce site par l'infrastructure de recherche OZCAR par l'IPGP. L'UMR est également chargée du suivi de long terme de la présence de pesticides de ce bassin versant et y mène des expérimentations sur leurs impacts écotoxicologique sur les populations piscicoles.

L'observatoire de l'Orgeval a aussi permis à nos chercheurs de développer des approches innovantes en hydrogéophysique, fondées sur des approches time-lapse en sismique, pour évaluer le mouvement vertical des nappes superficielles dans une zones riparienne (Dangeard et al., 2018,2021)

Enfin, malgré les difficultés liés à la situation politique souvent difficile, nous cherchons à maintenir nos activités en Afrique avec des travaux dans des pays du Sahel (Burkina, Tchad, Mauritanie, Rusagara et al., 2022) et une

forte implication récente à Madagascar (programme SAFE-M co-porté avec l'Université Paris-Cité) impliquant l'instrumentation de sites pérennes.

2. Consolider et intégrer l'effort de modélisation

Le bilan ci-dessus montre à quel point la modélisation est un outil majeur de notre unité, avec de nombreux développements et applications dans les deux départements. Le département BIOGEO développe de longue date le modèle pyNuts-Riverstrahler (qualité biogéochimique des cours d'eau et de leurs annexes, pouvant être couplé à un modèle d'estuaire, Laruelle et al., 2019), ainsi que l'outil GRAFS qui produit des bilans spatialisés de N, P et C (Le Noë et al., 2017). Le département H2GS2 utilise et développe des codes très variés, en (hydro)géophysique (modèles pétrophysiques, approches inverses), en hydrogéologie (module de gravière pour le modèle CaWaQs, modélisations spécialisées des milieux froids, exploitation de modèles commerciaux MODFLOW, HYDRUS et GOLDSIM), et en hydrologie (GR4J et ORCHIDEE, labellisé par l'INSU en 2019).

Si toutes les équipes ont clairement fait progresser leurs modèles, nous n'avons pas réussi à nous structurer suffisamment pour atteindre nos objectifs transversaux : favoriser le partage d'expérience et avancer sur le couplage de certains modèles, notamment pyNuts-Riverstrahler et ORCHIDEE. La future équipe Hydrosystèmes, en rassemblant les développeurs de ces deux modèles, devrait permettre des avancées dans ce sens, comme détaillé plus loin.

3. Trajectoires de l'anthropo-écosystème

Ce projet transversal s'appuie largement sur les outils de modélisation mentionnés ci-dessus. Il n'a donné lieu qu'à un seul article associant les deux départements, sur l'évolution de l'eutrophisation des estuaires en contexte de changement climatique (Raimonet et al., 2018), mais de nombreux résultats ont été obtenus de part et d'autre.

Dans le département H2GS2, ils définissent le Thème 2 - Impacts anthropiques sur les hydrosystèmes et le climat / Trajectoires. Comme détaillé plus haut, les travaux ont beaucoup porté sur la caractérisation des impacts du changement climatique et l'adaptation (Wu et al., 2020, **PF8** ; Sergeant et al., 2021 Arboleda et al., 2022; L'Hermite et al., 2022 ; thèse de Lemaitre-Basset ; projet Explore2), l'attribution des tendances passées (Padron et al., 2020), et les impacts long-terme de l'irrigation (Al-Yaari et al., 2022). Se rattache aussi à cette thématique la contribution, via le modèle ORCHIDEE, aux projections réalisées avec le modèle climatique de l'IPSL (Mizuochi et al., 2019 ; Boucher et al., 2020 ; Cheruy et al., 2020) pour le programme international CMIP6.

Au sein du département BIOGEO de nombreux projets ont également porté sur l'analyse des trajectoires passées et futures de la société et de l'environnement qu'elle construit. Beaucoup de ces travaux ont porté sur les systèmes agri-alimentaires, analysant à la fois l'impact des types de système agricole sur l'exportation de sous-produits vers les hydrosystèmes et sous forme de gaz à effet de serre, et les leviers qui permettraient de passer d'un type d'agriculture à un autre (Romero et al., 2022, Barataud et al., 2022, Lassaletta et al. 2021, Billen et Garnier, 2021, Flipo et al., 2020). L'unité est aussi fortement impliquée dans l'analyse des trajectoires passées de la société au travers de l'étude des archives sédimentaires (cf **PF11**), ce qui se traduit à la fois par un travail de terrain et d'analyse conséquent et par très bonne reconnaissance d'une de nos membres spécialisée en histoire de l'environnement (ANR Huniwers, ANR Trajectoire, projet ARCHISeine du PIREN-Seine avec les archives nationales, Legrand et al. 2020, Le Pichon et al. 2020,). Ces travaux peuvent aussi porter une empreinte plus marquée en termes des sciences sociales et sciences historiques alors que sont étudiées les rapports de la société à son environnement (Meybeck et Lestel, 2017, Dmitrieva et al., 2018, Bouleau et al., 2017).

4. Archéométrie

Bien que nous n'ayons pas pu faire émerger une structure de réflexion sur l'archéométrie au sein de l'unité, nos deux départements sont restés très actifs dans le domaine. Un point marquant a été la rédaction d'une convention avec l'INRAP qui nous permet aujourd'hui d'accueillir ses chercheurs, et d'intervenir plus facilement sur ses chantiers. Ainsi 12 publications dans la domaine de l'archéométrie associant le chercheur (unique pour l'instant) associé à l'unité sont référencées. Les chercheurs de l'unité ont participé à différents chantiers, apportant leur expertise en géophysique et en interprétation archéométrique des signaux géophysiques, par exemple : les jardins perses antiques (UMR Archéorient, Thiesson et al., 2019), les jardins de

l'évêché de Bourges (conservatoire du patrimoine, Thiesson et al., 2021), des sites gallo-romains perturbés en région parisienne (UMR AOROC, Dabas et al., 2021). Nous sommes également actifs dans l'analyse des pierres calcaires des monuments (basilique de Saint Denis, Sainte Chapelle, Souffaché et Tabbagh, 2021) Au sein du département BIOGEO, nos compétences sur l'analyse des matières organiques anciennes ont permis d'interroger l'utilisation du ^{13}C dans l'étude des charbons anciens (foyers, feux anthropiques), très utilisés en archéologie et en paléoclimatologie (Mouraux et al., 2022, Dufraisse et al., 2022). Finalement, les deux départements ont été impliqués dans le chantier de Notre-Dame de Paris avec à la fois des travaux sur l'étude des pierres après l'incendie et celle des bois brûlés de la charpente.

5. GéoProcess

Le projet transversal GéoProcess a été soutenu en 2017 par le programme Emergence - Ville de Paris pour développer des méthodes innovantes de détection de la pollution des sols et sous-sols par les hydrocarbures. Cette pollution doit être détectée, quantifiée, puis son évolution et sa remédiation doivent être surveillées. Ces suivis sur sites sont classiquement faits à travers un ensemble de mesures qui nécessite de prélever des échantillons ou de creuser des puits de surveillance. L'hydrogéophysique et la biogéophysique sont des disciplines récentes qui regroupent un ensemble de techniques de caractérisation de la proche surface non-intrusives (c'est-à-dire ne nécessitant pas que le sol soit creusé). L'intérêt majeur de ces deux nouvelles approches réside dans la sensibilité des signaux physiques mesurés aux propriétés du milieu naturel (structures et matériaux géologiques), à ses caractéristiques hydrogéologiques statiques et dynamiques (porosité, saturation en eau, flux hydrique) et à la présence de contaminants potentiels (solutés, organiques). La jeune équipe GeoProcess, propose de développer une approche novatrice pour diagnostiquer et suivre la dépollution de polluants de type hydrocarbures qui représentent les principaux polluants des sols en France avec les métaux lourds. L'originalité de cette équipe sera d'apprendre à interpréter des variations de propriétés physiques des sols en termes de variations de propriétés chimiques et/ou biologiques, c'est-à-dire d'utiliser des mesures physiques pour suivre des processus biogéochimiques de dépollution. Afin de mieux comprendre les liens entre ces paramètres physiques et chimiques ou biologiques, l'approche proposée par la jeune équipe GéoProcess est basée, dans un premier temps, sur l'expérimentation en laboratoire, là où les processus biogéochimiques peuvent être suivis et contrôlés.

Les travaux menés ont fortement fédéré ses participants (des deux départements) et GéoProcess devient une équipe à part entière (au sens de l'HCERES) dans notre projet 2025-2029, sous le nom de SO(i)LS.

4-2 Vers une nouvelle organisation

Forces-Faiblesses-Opportunités

Le bilan ci-dessus montre la solidité et l'originalité des travaux de recherche de nos deux départements. Ces travaux s'appuient sur des compétences disciplinaires fortes et reconnues (en chimie et géochimie, écologie, géophysique, hydrologie et hydrogéologie, et plus récemment en microbiologie et histoire de l'environnement), et contribuent substantiellement à faire progresser les connaissances sur la zone critique. Nous nous focalisons sur les transferts d'eau, carbone, nutriments et polluants impliquant les hydrosystèmes continentaux comme élément central du continuum Sol-Eau/Terre-Mer, sur les processus qui couplent ces transferts, et sur leurs conséquences environnementales (pollutions, écosystèmes, agriculture, santé, gestion de l'eau, etc.) à court et long-terme, par des méthodes variées (chimie analytique, suivis terrains, expérimentations, instrumentation, modélisation). Comme la grande majorité des unités de recherche travaillant dans le champ de l'environnement, une part croissante de nos travaux vise à documenter l'empreinte croissante des activités humaines, à prévoir leurs évolutions, tout en élaborant des solutions pour les réduire (biochars, adaptation au changement climatique, agriculture biologique...).

Dans ce cadre, notre projet d'unité en 2016 mettait un fort accent sur des projets transversaux entre les deux départements, selon la conviction que les sciences de l'environnement demandent une pluridisciplinarité renforcée. Les objectifs d'intégration entre les deux départements ont été des succès pour l'équipe GéoProcess et les Observatoires partagés. Les trois autres projets transversaux ont été moins aboutis en termes d'animation transversale, même s'ils ont été alimentés par de nombreux travaux de qualité mais mono-département. Nous avons sans doute été trop ambitieux vu notre effectif, mais cet échec relatif peut aussi

s'expliquer par la crise covid, qui n'a pas aidé les collaborations, y compris internes, en 2020 et 2021. En ce qui concerne l'effort de modélisation, nous avons aussi souffert du départ d'un IR calcul récemment arrivé, et de celui de notre unique ASR en 2019, ce qui a mobilisé les chercheurs et EC sur des tâches d'administration de machines au détriment de nouveaux projets de modélisation couplée.

Le covid nous a néanmoins offert une belle opportunité de développer des travaux très pointus sur l'intérêt des eaux usées comme marqueurs de la contamination par les pathogènes, en l'occurrence celle au SARS-CoV2, via le projet Obepine, avec un soutien fort de SU et une collaboration renforcée avec Eau de Paris, l'EPIC de la ville de Paris chargé de l'approvisionnement de Paris en eau potable. Cette collaboration très fructueuse, qui se traduit aujourd'hui par le démarrage d'une thèse en co-encadrée, pourrait se concrétiser par une association de METIS et d'Eau de Paris pour notre prochain quinquennal, selon des modalités qui restent à définir avec l'ensemble des tutelles.

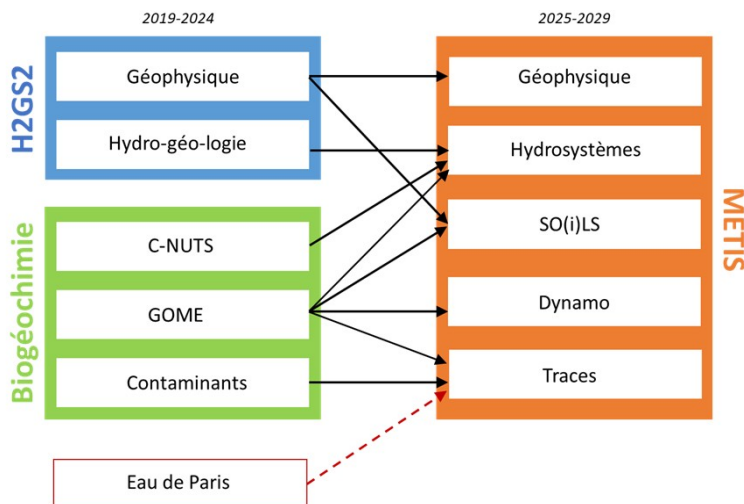
Finalement, le dernier point marquant des six dernières années fut un **gros renouvellement générationnel**, marqué par de nombreux départs (14 départs à la retraite dont 6 de chercheurs et EC très structurants, et 6 mutations, dont notre ASR et un IR calcul, une technicienne en gestion récemment arrivée, et une DR CNRS partie comme Professeure Associée à l'ENS). Ces départs ont été partiellement compensés par 7 recrutements, dont deux retours d'EC qui avaient quitté METIS pour leur évolution de carrière et renforcent maintenant notre effectif de rangs A, mais aussi trois jeunes chercheurs/EC portant des thématiques novatrices (biochars, hydrogéophysique, contaminants organiques), et aussi trois personnels techniques, un par département, et un nouvel ASR (partagé avec l'UMR iEES). Une autre évolution de METIS, comme dans beaucoup d'unités françaises sans doute, est l'augmentation de la part des CDDs pour compenser l'érosion des effectifs permanents, l'effectif total ayant augmenté de 10%.

Une organisation repensée, autour de 5 équipes

Nous avons mené un gros travail pour que l'organisation future de METIS accompagne ce renouvellement de génération et les réorientations thématiques qui en découlent. Pour permettre aux chercheurs et EC en milieu de carrière de s'affirmer scientifiquement et de contribuer plus activement à la stratégie scientifique de l'unité, nous avons fait le choix de renoncer à nos deux départements disciplinaires pour nous organiser selon cinq équipes, orientées "objets" donc pluridisciplinaires pour 4 d'entre elles, ce qui devrait également permettre un meilleur brassage interdisciplinaire au sein de l'unité :

- Equipe **DYNAMO** : Dynamique spatio-temporelle de la matière organique (Resp : Arnaud Huguet, CR CNRS)
- Equipe **Géophysique** (Resp : Ludovic Bodet, MCF SU)
- Equipe **Hydrosystèmes** (Resp : Ludovic Oudin, MCF SU)
- Equipe **SO(i)LS** : Study Of physico-biogeochemical processes in Soils / étudeS des processus physico-biogéochimiques des soLS (Resp : Damien Jougnot, CR CNRS - DR en 2023-)
- Equipe **TRACES** (Resp : Elodie Guigon, MCF EPHE)

Comme illustré ci-dessous, cette organisation en cinq nouvelles équipes s'appuie sur les cinq équipes fonctionnelles qui ont structuré en pratique une large part du travail collectif et de l'animation scientifique depuis 2017, notamment lors des confinements. Les flèches montrent cependant une forte recomposition, qui vise un meilleur affichage, et une meilleure animation des thématiques de recherche actuellement actives au sein de notre unité. Il s'agit aussi d'accompagner le ralentissement de certaines thématiques portées par des chercheurs qui ont pris leur retraite pendant le dernier contrat ou qui la prendront lors du prochain, en particulier au sein de l'actuel département BIOGEO (départ à la retraite de 3 rangs A depuis 2017, avec un départ probable de 3 autres d'ici à 2029).



Une autre évolution importante de notre unité pourrait être l'**association de l'équipe R&D d'Eau de Paris**, dirigée par Laurent Moulin (HDR) et comportant 10 autres personnes dont 4 ingénieurs de recherche. Cette équipe travaille sur l'analyse et la compréhension des déterminants de la qualité de la ressource en eau du bassin parisien, et pourrait rejoindre la future équipe TRACES de METIS, avec des synergies très intéressantes sur les développements analytiques et la microbiologie, sanitaire en particulier et plus de potentiel pour aborder des thématiques "One Health". Les collaborations avec Eau de Paris permettraient également de développer des projets consacrés à la gestion de la ressource en eau (qualité de l'eau, avec l'équipe Hydrosystèmes), ou l'utilisation de techniques géophysiques pour le suivi de certains procédés de traitement (contenus en eau avec l'équipe géophysique; charbons actifs avec l'équipe SO(i)LS). L'équipe TRACES continuera aussi sa collaboration avec l'équipe de microbiologie de l'UMR M2C (2 MCF).

Cette évolution des équipes de recherche amène à repenser **le fonctionnement de nos pôles techniques** (chimie analytique, instrumentation géophysique, mesures terrain, et systèmes d'information, cf organigramme prévisionnel en Annexe 3). Au cours du précédent contrat, ces pôles techniques étaient rattachés aux groupes de recherche qui assurent scientifiquement et financièrement leur fonctionnement, ce qui tend à cloisonner les recherches et les personnels d'appui à la recherche (PAR). Pour préparer notre nouvelle structuration, un groupe de travail s'est mis en place pour réfléchir à une nouvelle organisation permettant un fonctionnement plus harmonisé et plus efficace des pôles techniques. Les points d'attention sont les suivants : la relation entre groupes de recherche et plateformes, l'accessibilité des plateformes pour les utilisateurs, la gestion financière des plateformes, et enfin l'interopérabilité entre les personnels d'appui à la recherche. Ces discussions sont encore en cours pour trouver le mode de fonctionnement qui permette de profiter au maximum de notre savoir-faire technique tout en assurant l'intégration des personnels techniques dans les projets de recherche, ainsi qu'un soutien financier facilité pour les commandes courantes. L'idée est de garder un lien fort entre la recherche menée au sein des équipes et les pôles techniques (tous les PAR sont rattachés à au moins une équipe), de promouvoir les pôles comme lieu de formation des étudiants, et d'améliorer le dialogue entre les PAR de l'unité. Il est probable que cette coordination passera par un comité de pilotage associant chercheurs et PAR, sous l'animation d'Hélène Blanchoud, qui restera directrice-adjointe (DA) de l'unité. Ce comité de pilotage permettra aussi de gérer les accès au parc analytique d'Eau de Paris si l'association se concrétise.

La direction de l'unité, comme ses équipes, évolue dans la continuité. Agnès Ducharme (DR CNRS), actuellement DU-adjointe, a reçu l'approbation de l'AG de l'unité pour devenir DU. Hélène Blanchoud (MCF EPHE) reste DU-adjointe, et sera chargée des relations avec l'EPHE et du comité de pilotage des pôles techniques. Il nous reste à identifier un.e deuxième DU-adjoint.e, idéalement rattaché.e à SU, pour appuyer la DU dans les relations avec notre tutelle hébergeante et gestionnaire. La gestion au quotidien de l'unité s'appuiera sur des réunions périodiques (toutes les 2-3 semaines environ) d'un comité de direction associant aussi les responsables d'équipe et la responsable administrative de composante, également gestionnaire de l'unité. Le conseil de laboratoire sera renouvelé, par l'élection de 6 membres élus (2 pour chacun des 3 collèges : EC/chercheurs; ingénieurs et techniciens; doctorants, post-doctorants et ATERs), qui siégeront avec le comité de direction et un assistant prévention.

Le calendrier annuel de la vie du laboratoire restera similaire à celui mis en place lors du contrat actuel :

- 5 à 6 réunions du conseil de laboratoire, pour concertation élargie aux personnels et avis consultatifs sur toutes les questions relatives à la politique scientifique, la gestion des ressources, l'organisation et le fonctionnement de l'unité (notamment sur l'hygiène et sécurité, les sujets de thèse, demandes de postes et de moyens, choix d'investissement sur dotations des tutelles, appel d'offre interne – qui sera poursuivi) ;
- 1 à 2 AG par an (pour présenter les bilans budgétaires annuels, les nouveaux arrivants et nouveaux projets, les actions sur notre bilan carbone, ou les sujets mis en avant par les personnels) ;
- 1 journée scientifique annuelle, ce qui avait été très apprécié par l'ensemble de personnels jusqu'à ce que le covid remette en cause ce rendez-vous.

Dans ce cadre, la nouvelle direction s'est aussi engagée sur trois objectifs importants, en plus de ceux qui prévalent déjà (dont contrats ANR et européens, science ouverte, appel d'offre interne) :

- le renforcement d'une animation scientifique interdisciplinaire sur les thématiques principales du laboratoire (par ex par le suivi du programme des séminaires en conseil de laboratoire, avec financement d'invitations par l'unité) ;
- la proposition d'une animation spécifique pour accompagner les jeunes chercheurs (doctorants et post-doctorants), les personnels préparant un dossier de promotion, et les candidats au recrutement dans notre laboratoire ;
- la réduction du bilan carbone de l'unité, en articulation avec les démarches engagées à l'IPSL (groupe Climaction, GDR Labos1.5) et par nos tutelles.

Des chargés de missions spécifiques seront nommés pour avancer efficacement sur ces objectifs. Ils seront invités au conseil de laboratoire et restitueront leurs avancées et difficultés.

Menaces et opportunités lors du prochain quinquennal

Notre principale menace est la poursuite de l'érosion de notre effectif permanent, avec le départ annoncé de plusieurs professeurs et DR, en majorité rattachés actuellement au département Biogéochimie, avec des enjeux en termes d'enseignement, et pour préserver notre implication dans des fonctions à responsabilité dans les grands programmes structurants de l'unité (PIREN-Seine, ZA-Seine). Peut-être encore plus crucial, notre **gestionnaire** et responsable administrative de composante (IE CNRS) prévoit sa retraite à l'horizon du début du prochain contrat, et il nous faut la remplacer absolument pour la poursuite de nos activités et de celles du PIREN-Seine. Pour mémoire, METIS fonctionne avec un budget 10 fois plus important que celui alloué en dotation par ses trois tutelles.

De plus, de nouvelles perspectives s'ouvrent au sein de METIS avec des projets qui renforceront nos spécificités, comme l'élaboration de nouveaux capteurs bio-géochimiques et bio-géophysiques dans le domaine de l'hydrologie et de la chimie de l'environnement, ou le couplage de modèles quantité/qualité pour appréhender les trajectoires de la société dans son environnement. Ces perspectives sont soutenues par des projets déjà financés ou en développement, mais elles demandent à être renforcées par le recrutement de personnels permanents pour l'appui technique à la recherche, qui bénéficierait à l'ensemble des composantes de l'unité. 2 IR sur les thématiques précitées sont nécessaires.

Nos principales opportunités pour renouveler nos cadres sont :

- Le soutien de nos trois tutelles, et notre environnement de recherche très riche, avec possible reconnaissance de l'IPSL comme un OSU ;
- Les financements de type PIA : PEPRs (One Water avec portage du projet COMAIRS en phase 2; FairCarbon avec portage du WP8 modélisation du PC5 CarboNium; TRACCS avec portage d'une tâche du PC7 Processus biophysiques), PPR antibiorésistance, TERRA FORMA
- L'augmentation de notre vivier d'HDR et les promotions permises par la LPR (contre-balancées malheureusement par la progression du point d'indice plus lente que l'inflation)
- Notre attractivité pour les étudiants, grâce à nos thématiques scientifiques qui font sens (contre-balancée malheureusement par la faible attractivité de la région parisienne pour des raisons de cherté et mauvaise qualité de vie)

Finalement, si nous réussissons à accroître notre effectif, la place risque de devenir une limite, qu'il s'agisse de l'accueil de nouveaux permanents, de doctorants, post-doctorants ou invités, ou de l'installation de nouveaux matériels analytiques. Ces problèmes seront d'autant plus prégnants que nous réussirons à renforcer notre effectif permanent, ce à quoi nous nous employons en formant de jeunes chercheurs et en développant la veille et le soutien aux candidats extérieurs. Il faut aussi rajouter un gros problème de qualité de vie au travail et d'hygiène et sécurité, à savoir la température de plus en plus élevée dans les bureaux en été.

4-3 Projet scientifique (2025-2029)

Dans la présentation des futures équipes ci-dessous, une même personne peut appartenir à deux équipes, si bien que la somme des effectifs de chaque équipe excède celui de l'unité. L'effectif réel apparaît dans l'organigramme fourni en Annexe 3, qui ne détaille pas les différents statuts.

DYNAMO : Dynamique spatio-temporelle de la matière organique - Resp.: A. Huguet

L'équipe DYNAMO sera constituée d'1 CR CNRS, 3 MCF SU et 2 PAR (1 AI SU et 1 IE CNRS). Elle visera à caractériser et à comprendre l'état, le fonctionnement et l'évolution des milieux environnementaux d'un point de vue biogéochimique, en se plaçant à différentes échelles, spatiales (de la molécule au bassin versant) et/ou temporelles (temps présent et passé).

Dans un contexte de changement global et d'anthropisation croissante des écosystèmes, il est essentiel de mieux contraindre la dynamique de la matière organique (MO) le long du continuum Homme-terre-rivière-mer pour compléter les connaissances acquises sur ces écosystèmes, souvent considérés de manière séparée. Comprendre de manière détaillée les transformations de la MO est un prérequis indispensable afin de (i) mieux appréhender son rôle au sein des processus physico-chimiques et biologiques dans les milieux environnementaux, et (ii) affiner les modèles de fonctionnement biogéochimiques des écosystèmes. Cette problématique demeure un **défi analytique et méthodologique** au niveau international de par (i) la nature hétérogène de la MO, véritable boîte noire chimique et réactionnelle et (ii) l'état dynamique de ce matériel. Nous proposons, via une approche multi-outils (biogéochimiques, microbiologiques, isotopiques) appliquée aux différents compartiments de l'environnement (végétation, sol, eau, sédiment), de suivre la dynamique de la MO le long de bassins versants contrastés et bien documentés, i.e. tempérés et arctiques.

En milieu tempéré, nous poursuivrons les travaux menés dans le cadre des programmes de recherche de la Zone Atelier Seine. Nous étudierons, dans la colonne d'eau, les sources, les transformations et le devenir de la MO le long de l'axe Seine, du fleuve jusqu'à l'estuaire et prendrons en compte les apports de matériel liés aux zones humides latérales, peu considérés à ce jour (projets Seine-Aval CAFEZH et EVEREST). Nous étendrons nos travaux en comparant le fonctionnement biogéochimique de l'estuaire de la Seine à celui de la Gironde, dont le bassin versant est bien moins anthropisé. Nous développerons une approche interdisciplinaire, sur le terrain et en laboratoire, qui fournira pour la première fois une cartographie détaillée des caractéristiques moléculaires de la MO en lien avec la diversité des communautés microbiennes et la production primaire le long du continuum continent-océan de la Seine et de la Gironde (EC2CO RUNTIME). Les outils de microbiologie environnementale, géochimie organique et isotopie seront complémentaires.

Ces approches seront également utilisées pour mieux comprendre le **rôle des microorganismes** dans la dégradation de polluants organiques. En effet, outre leur rôle majeur dans les cycles biogéochimiques, les microorganismes peuvent naturellement dégrader des substances toxiques. La dégradation du benzo(a)pyrène (B(a)P) par le champignon *Talaromyces helicus* (projet EC2CO REMYSOL) sera ainsi étudiée en microcosmes de sols afin de mieux comprendre quels paramètres influent sur l'accès du champignon au polluant et sur sa dégradation (Collaboration UT Compiègne). En collaboration avec l'équipe TRACES, nous chercherons à répertorier les produits de dégradation du B(a)P dans les sols, inconnus actuellement. En collaboration avec l'équipe SOILS, la dégradation d'un autre polluant (le toluène) sera abordée à différentes échelles (macro- et microsystèmes). Des approches de biologie moléculaire et de génétique seront mises en place pour construire des souches bactériennes fluorescentes qui pourront être suivies dans les différents systèmes étudiés (ANR IMAGE) ou pour identifier des gènes fongiques nécessaires à la bioremédiation.

Nos travaux se placeront par ailleurs dans la perspective de pouvoir parvenir à la neutralité C et de limiter, à l'échelle mondiale, l'augmentation de température. Cela nécessite d'acquérir une meilleure compréhension du cycle du C et de son couplage avec les autres cycles biogéochimiques (N, P) dans les écosystèmes terrestres. Nous proposons dans ce sens d'évaluer les stocks de C dans les sols agricoles tempérés, responsables d'une part non négligeable des émissions de gaz à effet de serre en milieu terrestre et d'y examiner manière détaillée le fonctionnement des cycles des éléments majeurs (C, N, P), qui sont étroitement liés (PEPR FairCarbon). Une approche semblable sera également menée en milieu arctique, dans la suite des projets initiés ces dernières années. Nous nous intéresserons ainsi au dégel des pergélisols, sols perpétuellement gelés que l'on trouve dans les zones arctiques et qui contiendraient plus du double de carbone que l'atmosphère. Le dégel de ces sols pourrait donc induire un accroissement du taux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et influencer le climat planétaire. Il est donc indispensable de mieux comprendre et de modéliser les processus biogéochimiques liés au dégel de ces sols (projet FairCarbon).

La dynamique des milieux environnementaux peut être considérée aussi bien aux temps présent que passé. Sur des échelles de temps couvrant quelques milliers à centaines de milliers d'années, l'étude des variations environnementales passées apparaît comme essentielle pour aider à prédire les évolutions futures de l'environnement. Notre connaissance des modifications climatiques passées repose principalement sur l'utilisation de marqueurs de paramètres de l'environnement, majoritairement développés en milieu marin. Cependant, il est essentiel de développer de nouveaux marqueurs applicables aux milieux continentaux. Durant les prochaines années, nous chercherons à tester et à valider, en milieu lacustre, l'applicabilité d'un nouveau marqueur des conditions de température et de pH basé sur des molécules d'origine bactérienne (acides gras 3-hydroxylés), que nous avons précédemment étudiées dans les sols. Ces lipides et les bactéries les produisant seront étudiés *in situ* dans les lacs et en laboratoire en couplant les approches de géochimie organique, isotopie et microbiologie environnementale pour comprendre le mécanisme d'adaptation de ces microorganismes aux variations des conditions environnementales. Ces marqueurs seront ensuite appliqués à des archives sédimentaires lacustres bien documentées pour valider leur fiabilité (ANR ALPINE).

Plus globalement, nos travaux privilégieront la mise en place d'**approches multi-marqueurs**, en particulier lipidiques et isotopiques, pour augmenter la fiabilité des reconstructions paléo-environnementales. Ces marqueurs pourront être appliqués à différents types d'enregistrements. Ils permettront de déterminer dans quel contexte paléo-environnemental et climatique ont évolué certains territoires bien documentés (e.g. bassin de la Seine ; projet franco-brésilien SARAVA). Les archives de bois anciens, carbonisés ou non, seront plus particulièrement utilisées pour préciser les variations climatiques récentes autour du bassin de la Seine durant le Moyen-Âge et notamment l'optimum climatique médiéval, encore mal documenté en Europe continentale. Ce projet s'inscrit dans la continuité de ceux en cours sur la caractérisation pluridisciplinaire des bois de la charpente de Notre Dame de Paris et autres édifices contemporains.

Enfin, l'équipe DYNAMO se basera sur son expertise reconnue en géochimie organique pour proposer de nouvelles approches méthodologiques. La plupart des études (paléo)environnementales menées à ce jour se sont basées sur un nombre restreint de familles de molécules organiques. La lipidomique, qui permet l'analyse simultanée de plusieurs centaines à milliers de lipides, est un domaine de recherche émergent, que nous chercherons à développer. Nous devrions ainsi accéder à un niveau d'information inégalé et obtenir une cartographie complète des composés organiques présents dans les échantillons actuels et passés. Cela devrait permettre d'avoir une vision globale de la réponse des organismes aux changements environnementaux et devrait aider à identifier de nouveaux marqueurs (paléo)environnementaux.

Géophysique - Resp. : L. Bodet

L'équipe Géophysique sera constituée de 7 EC SU (dont 2 PR), 2 PAR (1 IE et 1 IR CNRS), 3 chercheurs associés (2 à l'INRAP et 1 à Arts et Métiers - ENSAM) et 3 collaborateurs bénévoles. Parmi les EC, 2 seront également rattachés à l'équipe SO(i)LS et 1 sera rattaché à l'équipe Hydrosystème, en relation avec les projets et axes de recherches qui se sont développés en *hydrogéophysique* et *biogéophysique*, entre les équipes actuelles (cf. *supra*). L'équipe visée possède une très longue et grande expérience dans le domaine de la géophysique de proche-surface, dont elle est parmi les leaders en France et en Europe, et héritière des précurseurs. Aussi appelée "géophysique appliquée" ou "prospection géophysique", cette discipline consiste, par définition, en "l'application des lois, théories et techniques de la Physique" à l'imagerie ou l'étude des caractéristiques, propriétés et processus, des premières dizaines à centaines de mètres de profondeur de la Terre, à partir de

mesures effectuées le plus souvent en sa surface. L'équipe dispose d'un parc d'instruments et d'équipements géophysiques unique en France, (cf. H2.4.) à travers la gestion de la plateforme Terre-Mer-Sols (TMS) de l'OSU Ecce Terra. L'équipe peut donc répondre à des problématiques très variées via la maîtrise d'une gamme très importante de la palette des méthodes géophysiques actives et passives (méthodes électriques par courant continu, de potentiel spontané et de polarisation provoquée, induction électromagnétique, radars-sols, prospections magnétiques, sismiques de proche surface etc.).

Dans ces domaines, l'équipe propose des **développements théoriques, méthodologiques et instrumentaux** en partant d'objectifs très concrets et souvent à l'initiative d'autres géoscientifiques (géologues, hydrogéologues, géochimistes, géotechnicien.nes, pédologues, archéologues...) ayant besoin d'imager et/ou de comprendre le milieu qu'elles ou ils étudient. La première approche consiste très souvent en la mise en œuvre d'une ou plusieurs campagnes de mesures de terrain, réalisées à partir d'outils et de méthodes standards. Si les résultats ne permettent pas de répondre aux questions posées, la méthode, l'outil et voire même les techniques de traitement et d'interprétation associées sont remis en cause. L'équipe propose alors de réviser les stratégies de mesure, de reprendre les concepts et théories sous-jacents, de simuler puis tester *in situ* des approches alternatives, afin de concevoir de nouvelles méthodologies plus adaptées aux objectifs initiaux. L'équipe propose, à travers cette démarche, l'étude des couplages possibles entre différentes observables géophysiques, leurs liens avec les propriétés physiques et mécaniques des sols, leur modélisation et inversion. Les développements méthodologiques de l'équipe s'accompagnent d'innovations instrumentales grâce à l'appui d'un IE en électronique géophysique. L'ensemble des instruments (développés en interne ou bien acquis dans le cadre de projets et de conventions) sont intégrés au parc "Sols" de la plateforme TMS qui participe au régulièrement à la maintenance et au renouvellement du parc. TMS est, depuis de décembre 2022, renforcée par l'arrivée d'un IR CNRS en instrumentation géophysique affecté à l'OSU Ecce Terra mais affilié aux équipes Géophysique et SO(i)LS via son implication dans les activités scientifiques de l'IR OZCAR et de l'Equipex + TERRA FORMA.

Quelles que soient les approches, les méthodes ou les techniques de mesures, traitements et interprétations, les objectifs visés par l'équipe sont fondamentaux comme appliqués. Ses travaux seront proposés (dans la continuité des projets passés ou en cours) dans le cadre de structures et de programmes fédérateurs à toutes les échelles : locales (IPSL, FIRE), nationales (projets INSU ; ANR ; coop. BRGM, Mines Paris, Ecole des Ponts ParisTech, CEREMA ; INRAP ; programme PIREN-Seine ; PIA1 Equipex CRITEX, équipe porteuse de 2 WP ; Infrastructure de Recherche OZCAR ; PIA3 Equipex+ TERRA FORMA ; SNO H+ en tant qu'équipe associée); comme internationales (réseau GEOFCAN ; COST SAGA, ITN ENIGMA, coop. US Air Force). Une part très importante des projets et ressources budgétaires associées sera portée dans le cadre de conventions/partenariats avec l'industrie (comme récemment et actuellement avec des FUI, conventions CIFRE SNCF Réseau, EDF, Envisol etc.) à des TRL variés.

Ces projets et la majeure partie des travaux qui sont menés par l'équipe font l'objet d'**actions à caractère pluridisciplinaire**, car ils sont développés avec les partenaires hydrogéologues, géologues, géochimistes, géotechnicien.nes, pédologues et archéologues mentionnés *supra*. Les actions à mener, naturellement en lien avec les enjeux sociétaux et environnementaux actuels et futurs, relèvent en particulier :

- de la reconnaissance des sols et des matériaux dans le cadre de l'étude de la zone critique au sens large, avec et au-delà des réseaux et structures mentionnées plus haut ;
- de l'aménagement de l'environnement naturel, urbain & péri-urbain ou agricole ;
- de la préservation du patrimoine et de l'archéologie ;
- de l'étude des risques naturels (e.g. stabilité des terrains) et anthropiques (e.g. pollutions des eaux et sols).

Dans ces domaines, l'équipe s'attachera à proposer des méthodes d'interprétation et/ou d'inversion combinées des données géotechniques, hydrogéologiques, géochimiques et géophysiques pour en proposer une meilleure exploitation (méthodes allant de l'inversion linéarisée aux techniques d'apprentissage profonds en passant par les approches probabilistes ou stochastiques, toutes déjà mises en œuvre par l'équipe). Dans la même optique, l'équipe poursuivra son adaptation des techniques de traitements par apprentissage à la cartographie géophysique, pour l'interprétation multi-destinataires et l'estimation des corrélations d'observables géophysiques, géotechniques, pédologiques, etc. Elle continuera de développer des méthodes de monitoring géophysique actifs et passifs mais cherchera à employer et développer des

instruments « low-cost », à intégrer de l'équipement géophysique à des vecteurs autonomes (drones) terrestres ou aériens et proposer l'utilisation d'attributs alternatifs des signaux géophysiques.

Hydrosystèmes- Resp. : L. Oudin

L'équipe Hydrosystèmes travaillera à comprendre le fonctionnement et l'évolution des hydrosystèmes continentaux, d'un point de vue quantitatif et qualitatif à des échelles de temps et d'espace diversifiées. Elle regroupe les membres de l'actuel département H2GS2 travaillant sur l'hydrodynamique ainsi que des membres de l'actuel département BIOGEO. Elle sera constituée de 8 EC SU (dont 2 PR), 2 DR CNRS, 7 PAR, et 3 émérites. Les rattachements multiples concernent 1 DR et 1 PAR avec TRACES, 1 PAR avec DYNAMO et 1 MCF avec Géophysique.

L'équipe entend poursuivre ses travaux sur la caractérisation des surfaces et interfaces continentales, dans une optique de **compréhension des transferts d'eau et de matière**, et de **quantification et protection de la ressource en eau** (d'un point de vue tant quantitatif que qualitatif). Les eaux souterraines constituent l'essentiel de cette ressource et une gestion durable de celles-ci est indispensable au développement équitable de nos sociétés. L'équipe a acquis et continuera à développer une expérience des écoulements souterrains dans des milieux de propriétés diverses (alluvions, craie, karst, socle et milieux volcaniques). La recharge (naturelle sous différents climats mais aussi artificielle, actuelle et future) de ces aquifères est un des sujets stratégiques pour le futur qui fera l'objet d'études particulières. En effet, la quantité mais aussi la qualité de la recharge conditionnent le volume des prélèvements dans les aquifères. Ces travaux continueront à être menés en collaboration avec l'équipe Géophysique ainsi qu'avec l'équipe TRACES.

Sur l'observatoire de Saint-Martin-le Noeud (**PF2**), l'acquisition de données va se poursuivre et des travaux sur la modélisation du transport réactif des pesticides dans la ZNS de la craie seront proposés sur SMLN en un premier temps, puis testés à l'échelle du bassin parisien. Plusieurs projets actuels et envisagés sont développés en collaboration forte avec les pays du Sud, en particulier plusieurs pays du Sahel et Madagascar, avec des enjeux forts sur l'accès à la ressource en eau et l'exploitation durable de ces ressources. Le renforcement des capacités et compétences en hydrologie et hydrogéologie dans ces pays sera aussi au cœur d'une partie des activités de l'équipe via notre contribution aux enseignements dans ces pays, ainsi que par la formation par la recherche (doctorant.e.s du Sud en cotutelle).

Une des caractéristiques de l'équipe vient de ses compétences en **modélisation** quantitative et qualitative des flux de surface et souterrains d'eau, de carbone et de nutriments dans les hydrosystèmes, qui permettront une "fertilisation croisée" des outils existants (modèle pyNuts-Riverstrahler du fonctionnement biogéochimique des hydrosystèmes, et modèles hydrodynamiques ORCHIDEE et GR4J), pour pouvoir aborder des problématiques nouvelles. La modélisation des transferts de chaleur pour décrire la température des cours d'eau est en projet pour pyNuts, et a commencé dans ORCHIDEE (le couplage avec le modèle hydrogéologique CaWaQs de MinesParis permettant de tenir compte des apports de chaleur par les nappes). Ces développements offrent le cadre pour une généralisation aux transferts de matière, et permettent d'envisager des couplages renforcés entre ORCHIDEE, pyNuts et CaWaQs, en commençant par le cas d'école du bassin de la Seine (PIREN-Seine Phase 9). Ces couplages, ainsi que ceux des modèles hydrodynamiques et atmosphériques de l'IPSL, sont essentiels pour modéliser de nombreux processus aux interfaces (nappes/rivières, zones humides, interactions surfaces continentales - atmosphère, interface estuarienne), et aborder les questions de rétroactions qui structurent désormais les études d'impact et d'adaptation. C'est à ce titre que l'équipe continuera de demander le soutien d'un poste d'IR CNRS sur les couplages de modèles.

Enfin, l'équipe continuera de porter l'étude des **trajectoires**, à travers l'analyse des impacts anthropiques et du changement climatique sur les hydrosystèmes, qu'il s'agisse de l'impact des actions humaines du passé (modification du paysage, héritages des contaminations dans les parties terrestres, activités minières, imperméabilisation liée à l'urbanisation, irrigation), ou de la modélisation de scénarios prospectifs pour évaluer la résilience des hydrosystèmes et les possibilités d'adaptation au changement climatique (projets BLUEGEM et COMAIRS, voir ci-dessous). 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.

Projets structurants actuels :

- Implications/contributions dans les projets de l'IPSL, de la FIRE, du PIREN-Seine et de la ZA-Seine, Observatoire de Saint-Martin-le-Noeud (SNO Karst), projet SAFE-M à Madagascar (enseignement & recherche), projet OFB NUTS-STEAURY, développements ORCHIDEE (environnements urbains et irrigation, via projet Belmont BLUEGEM), impacts hydrologiques du changement climatique en France (Explore2), utilisation des données haute-fréquence pour une meilleure compréhension des processus affectant la qualité de l'eau (réseau MeSeine du SIAAP)
- Conventions de recherche avec agences de l'eau (Rhin-Meuse, AESN : état des lieux pressions diffuses), industriels (SNCF, Danone, Orano), et ONG (Action Contre la Faim) et organisations internationales (Banque Mondiale, AIEA).

Projets structurants envisagés :

- PEPR OneWater : projet COMAIRS ("Stratégies de co-construction pour l'infiltration et la recharge maîtrisée des réservoirs sol et aquifères pour la résilience des socio-hydrosystèmes : approche pluridisciplinaire"). Ce projet en 2ème phase d'évaluation est porté par D. Valdés et regroupe 40 chercheurs de 12 unités de recherche, autour des risques et potentialités de la recharge maîtrisée (solution basée sur la nature). Les chercheurs et les parties prenantes travaillent conjointement pour étudier : i) la capacité de la recharge maîtrisée à augmenter la ressource, ii) l'empreinte chimique et microbiologique et les processus de transport réactif associés, et iii) la capacité d'adaptation des parties prenantes et leur capacité "d'acceptation" de telles solutions
- PEPR FairCarbon : participation au PC5 CarboNium qui va permettre à la communauté du carbone aquatique d'acquérir de nouvelles connaissances sur la dynamique, les flux et les stocks de carbone des eaux de surface et souterraines, zones humides continentales et côtières et des estuaires. CarboNium constituera, pour la communauté scientifique française qui aborde les questions du cycle du carbone aquatique, un cadre collaboratif de développement instrumental, méthodologique et de modélisation. METIS animera le WP8 sur la modélisation à l'échelle du continuum Terre-Mer. Ce projet mobilise plus de 50 chercheur.se.s de 15 laboratoires, impliqués dans les infrastructures de recherche du CNRS et de l'INRAe (AnaEE, OZCAR, RZA, RéGEF, ILICO...).
- Plusieurs projets permettront de soutenir les développements hydrologiques du modèle ORCHIDEE, pour étudier l'influence des couplages surface/atmosphère et des pressions anthropiques sur l'évolution du climat et des ressources en eau : PEPR TRACCS (portage d'une tâche du PC "Améliorer la représentation des processus physiques dans les modèles du système Terre"), poursuite des développements sur les zones urbaines avec possibilité de soutien par l'IPSL (nouveau thème Urbain de l'EUR IPSL), couplage d'ORCHIDEE avec le modèle hydrogéologique CaWaQs pour modéliser la température des eaux souterraines et des cours d'eau (collaboration avec Agnès Rivière de MinesParis via le PIREN-Seine Phase 9). Ces travaux bénéficieront aussi de l'ouverture en 2023 d'un concours externe d'IR CNRS à l'IPSL sur la composante hydrologique d'ORCHIDEE.
- Pour le modèle pyNuts-Riverstrahler, un enjeu porte sur le développement de sa composante hydrologique et hydrogéologique pour analyser les impacts indirects du changement climatique sur le fonctionnement biogéochimique des hydrosystèmes continentaux. Dans le bassin de la Seine, un travail est déjà engagé autour du modèle hydrogéologique distribué à base physique (CaWaQs) permettant de modéliser de façon couplée les écoulements de surface et souterrains ainsi que le transport de soluté (PIREN-Seine Phase 9). À plus grande échelle, des couplages avec le modèle de surface continentale ORCHIDEE développé à l'UMR METIS sont également envisagés et porteront également sur les aspects thermiques.
- Les nouveaux produits dérivés d'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale offrent des perspectives très intéressantes pour la modélisation hydromorphologique et biogéochimique des hydro-écosystèmes, en complément des mesures in situ. En particulier les potentialités de la mission SWOT pour les hauteurs d'eau, ainsi que les produits « couleur des eaux continentales » du pôle Theia, devraient permettre de progresser (entre autres) sur la modélisation des retenues de type barrages-réservoirs. Des collaborations sont en cours en ce sens avec l'UMR Prodig (P. Passy).

SO(i)LS : Study Of physico-biogeochemical processes in Soils - Resp: D. Jougnot

L'équipe SO(i)LS (Study Of physico-biogeochemical processes in Soils / étude des processus physico-biogéochimiques des sols) sera constituée de 2 chercheurs CNRS, 4 EC SU, et 2 PAR (1 IR CNRS, 1 IE CNRS).

Une partie de l'équipe sera aussi associée à l'équipe Géophysique (1 MCF, 1 PR, 1 IR) tandis qu'une autre partie sera aussi affiliée à DYNAMO (1 MCF et 1 IE). Cette équipe largement pluri-disciplinaire s'attachera à étudier les processus qui ont lieu dans les sols à l'aide d'outils et d'approches (géo)physiques, (géo)chimiques et (géomicro)biologiques.

Le sol est une composante cruciale de notre environnement, cette zone si critique... Il s'agit de l'interface complexe entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et la biosphère. Ce compartiment peu épais est pourvoyeur d'un ensemble de services écosystémiques critiques et cruciaux pour soutenir la vie et sa diversité sur la planète. L'équipe SO(i)LS s'intéresse à l'étude des transferts et des fonctions du sol ainsi qu'aux processus qui y sont associés.

Ces études des sols, des transferts aux processus, s'inscrivent dans le nécessaire suivi des cycles beaucoup plus larges de l'eau et du carbone. Il s'agit à la fois d'étudier l'impact du contexte actuel de changement climatique sur ces cycles dans les sols et des services écosystémiques associés, mais aussi de proposer ou d'évaluer des solutions de mitigations (bioremédiation, résilience). Les méthodes à mettre en œuvre sont très largement pluri-disciplinaires en fonction du focus de l'étude à mener: de la géophysique à la géochimie en passant par la géomicrobiologie. Cette ambition scientifique est rendue possible par l'ensemble des spécialités des membres de l'équipe SO(i)LS et leur complémentarité pour générer une synergie.

Parmi les thématiques et les chantiers structurants cette nouvelle équipe, nous pouvons citer:

- **Sols, structures et transferts** : Suivi de l'évolution structurale et texturale des sols en réponse à l'activité biologiques (e.g., EC2CO MOCOMI, K. Quenea), impacts de la microstructure des sols sur les transferts hydriques et liens avec les mesurables géophysiques (e.g., modèles pétrophysiques, D. Jougnot)
- **Sols urbains et technosols** : Suivi sur le temps long du site de Limeil Brévanne (F. Delarue, J. Thiesson), technosol dans lequel a été incorporé du biochar (2% massique). L'objectif de ces travaux est de comprendre comment les biochar modifient les propriétés des sols (rétention en eau, biodiversité et fertilité) afin d'optimiser la croissance de plantes et, possiblement, la phytoremédiation associée.
- **Dégradation de la MO et cycle du carbone** : Suivi du devenir du carbone dans les sols, de sa transformation par les micro-organismes du sols (e.g., EC2CO 13ChaMOS, T.T. Nguyen Tu) à sa respiration (e.g., MITI BIOMASS, D. Jougnot, F. Delarue) à l'aide de proxy physiques et chimiques.
- **Sols pollués** : L'activité biologique de biodégradation de contaminant dans les sols et leur suivi avec des méthodes géophysiques et géochimiques couplées (e.g., ANR IMAGE, D. Jougnot, R. Guérin).
- **Transfert et devenir des micro-plastiques** : Quantification et transfert des microplastiques dans divers environnements, depuis les matières en suspension, jusqu'au biote, en passant par les sédiments, sous contraintes climatiques contrastées (e.g., ANR SPY TrACK, K. Quenea, C. Anquetil)
- **Evolution sur le temps long**: Analyse croisée des propriétés magnétiques et de la matière organique carbonisée (e.g. pratiques agroforestières anciennes en milieu tropical, F. Delarue, J. Thiesson) ; suivi du vieillissement des charbons dans les sols (e.g. ex-charbonnières, F. Delarue, K. Quenea, J. Thiesson).
- **Instrumentation** : Développement de capteurs (géo)physique pour suivre l'activité biogéochimique dans les sols (e.g., Equipex+ TERRA FORMA, S. Pasquet, J. Thiesson).

TRACES - Resp. : E. Guigon

L'équipe TRACES sera constituée de 12 personnes comprenant 1 DR CNRS, 4 MCF EPHE, 1 MCF SU, 3 EC associés (1 Pr et 2 MCF Univ. Rouen) et de 3 PAR (1 Tech EPHE, 1 AI SU et 1 IE EPHE). Le DR CNRS et l'AI SU seront aussi rattachés à l'équipe Hydrosystèmes. Les travaux de recherche de TRACES s'intéressent aux transferts des contaminants organiques et composés inorganiques à l'état de trace dans l'environnement et leurs impacts dans les écosystèmes.

Qu'ils soient d'origine anthropique ou naturelle, de nombreux composés sont présents dans l'environnement à l'état de trace, tels que les micropolluants ou les éléments minéraux. La dispersion de ces composés (pesticides, antibiotiques, produits pharmaceutiques, composés perturbateurs endocriniens ou minéraux) peut induire des effets néfastes chez l'Homme et dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. **Ce risque écotoxicologique peut aussi être couplé à un risque microbiologique et devenir un risque sanitaire et environnemental**, lorsque cette contamination chimique s'accompagne d'un apport en bactéries fécales dont des micro-organismes pathogènes parfois résistants aux antibiotiques.

Comprendre les transferts de ces contaminants et composés traces entre les compartiments environnementaux nécessite de mieux identifier leurs sources mais aussi d'étudier leur devenir (persistance, transformation, spéciation) dans les sols, l'eau ou l'air. En effet, leur partition entre les phases adsorbée (organique et/ou minérale), dissoute et gazeuse, leur stabilité, sont des paramètres clé pour caractériser leur dispersion et la contamination des milieux.

Le biote (microorganismes, organismes) joue aussi un rôle dans le devenir de ces contaminants et composés, *via* des processus de changements de spéciation, bioaccumulation, métabolisation, transport, bioamplification ou bien dilution trophique. Les effets écotoxicologiques peuvent alors être appréhendés en étudiant les potentielles perturbations des mécanismes physiologiques et des traits d'histoire de vie, dans une démarche intégrative et évolutive.

Ces études s'appuient sur des expérimentations de terrain (Zone Atelier, site des SNO) et en laboratoire, mais aussi sur des plateformes de chimie analytique et microbiologique (dont celle de la FR SCALE).

Les membres de l'équipe TRACES portent ou participent à de nombreux projets dont certains débutent à partir de 2023 ou commencent à envisager la poursuite des précédents projets (dépôts en cours ou en réflexion). Ces projets s'appuient sur des collaborations dans le milieu académique national et européen mais aussi dans la sphère socio-économique (i.e. AASQA, Association Cistude Nature, Société Fluidion). Certains de ces projets impliquent aussi des personnes rattachées aux autres équipes de l'UMR (DYNAMO, SO(i)LS, Hydrosystèmes) montrant le caractère pluridisciplinaire de ces projets et de l'UMR METIS.

Par exemple, parmi les différents **projets en cours ou futurs**, les membres de l'équipe TRACES sont/seront impliqués dans 6 ANR (dont 1 JCJC) à des degrés divers (porteur - JCJC, responsable de work-packages ou participant). De manière synthétique, ces projets visent à comprendre les transferts et les flux vers le milieu aquatique de composés organiques (traceurs d'exposition, antibiotiques et autres composés pharmaceutiques, pesticides, composés émergents) ou inorganiques (antimoine), leurs évolutions spatio-temporelles et les interactions avec l'écosystème. Pour les interactions avec l'écosystème, deux approches sont prévues : la première consistera à étudier comment les microorganismes modifient le devenir des composés (spéciation, biotransformation), la seconde s'intéressera aux effets des molécules sur les organismes (microorganismes, poissons, parasites). Les produits de dégradation/ métabolites pourront être recherchés en analyses ciblées (molécules connues) mais aussi en analyses non-ciblées grâce à l'acquisition récente d'une chromatographie liquide LC-Qtof au sein de la plateforme de chimie analytique. Plusieurs projets comportent aussi un volet de sciences participatives, impliquant des habitants ou des pêcheurs par exemple.

L'équipe TRACES a aussi une forte implication au niveau régional dans le cadre de la zone atelier Seine, du programme de recherche PIREN Seine et du SNO Observil. Pour le PIREN Seine, les membres de l'équipe TRACES participent activement aux travaux de recherche de la phase 8 se terminant en 2024, et préparent d'ores et déjà la co-construction de la phase 9 (2025-2028) autour de 4-5 thèmes structurants dont une thématique en discussion sur les effets des contaminants sur les écosystèmes et la santé humaine.