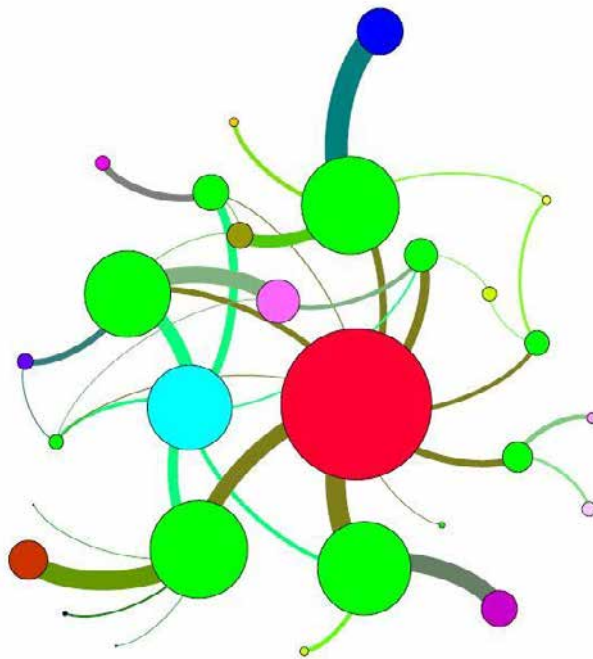


L'hydrologie à l'IRD



Auteurs : Frederique Seyler, Jean Albergel, Marie Paule Bonnet, Jean-Martial Cohard, Jean-François Cretaux, Jérôme Demarty, Luc Descroix, Guillaume Favreau, Frederic Frappart, Marielle Gosset, Frederic Jacob, Lionel Jarlan, Farid Juillot, David Labat, Pierre-Olivier Malaterre, Fabrice Papa, Thomas Stieglitz, Christine Vallet-Coulomb

Département DISCO « Dynamiques Interne et de Surface des Continents »

31 Décembre 2018

L'hydrologie à l'IRD

Hydrology has evolved as a transdisciplinary, data-driven science in a remarkably short period of time. Today, hydrology is a vibrant field that recognizes plants, landforms and human activity as key factors influencing the movement, quality and cycling of water.

Gabrielle, V. (2019), The renaissance of hydrology, <https://doi.org/10.1029/2019EO119179>, Published on 28 March 2019

Introduction

Cet état des lieux de la discipline « hydrologie » à l'IRD¹ se rapporte à une « hydrologie » au sens large, c'est-à-dire aux questions relatives au cycle de l'eau, à ses différents compartiments interdépendants et à leurs échanges.

Cet exercice a pour objectif de répondre à la question : « quels sont les verrous actuels de l'hydrologie au sens large, et comment l'IRD est positionné pour y répondre i) en considérant les champs de recherche couverts par la planète IRD constituée par les Unités Mixtes de Recherche (UMRs) sous tutelle IRD dans le champ des ressources en eau, ii) en se posant la question de l'existence d'une spécificité de ces verrous dans les domaines tropical et méditerranéen, iii) en se posant la question des enrichissements/biais éventuels d'un travail « au Sud » par rapport à ces verrous généraux, iv) en « cartographiant » les partenariats Nord et Sud existants.

Il est certain que les verrous scientifiques sont étroitement connectés aux enjeux (demande sociétale, politique, Objectifs du Développement Durable, partenariale). Ils sont également étroitement connectés au transfert de compétence et à la formation. Le parti-pris ici est de prendre le point de vue des verrous scientifiques, sachant que c'est seulement un point de vue sur une question globale et complexe. Les enjeux seront schématisés dans un paragraphe spécifique. Les aspects transfert de compétence et formation ne seront pas abordés.

Il s'agit d'un instantané pris à un moment déterminé, sur un champ de vision qui n'est pas forcément exhaustif de la discipline à l'IRD. Il est probable que le champ des ressources en eau soit abordé par d'autres départements que le département DISCO, ce qui pourrait amener des perspectives différentes, et même au sein du département, la méthodologie adoptée a fait que certaines équipes ont pu éventuellement échapper au recensement des activités.

Cette note présente donc les objectifs spécifiques de l'exercice et la méthodologie employée pour la réaliser, brosse schématiquement les enjeux de la discipline pour l'IRD, puis développe les résultats de l'analyse conduite.

¹ Cet état des lieux de la discipline « hydrologie » à l'IRD a été commencé lors de la réunion des Directeurs d'Unités (DUs) DISCO (Département Scientifique de l'IRD « Dynamiques Internes et de Surface des COntinents ») en Avril 2018, par la définition d'un groupe de travail constitué de membres des principales UMR dans la discipline, désignés par leurs DUs, et par le cadrage des objectifs. Il s'est poursuivi au cours de l'année par les travaux du groupe, qui ont principalement consisté en la sélection des textes de base à utiliser (rapports, prospectives et articles scientifiques) et par le recueil des réponses à un questionnaire basé sur les objectifs de l'exercice. Fin 2018 un premier texte a fait la synthèse des principaux résultats, ce texte a circulé dans la communauté pour être finalisé au cours du premier trimestre 2019.

Objectifs

- Identifier les grands enjeux actuels de la discipline, dans le cadre général du développement durable
- Mettre en évidence la place de la discipline à l'IRD dans le contexte national et international, les synergies en cours avec d'autres organismes, et les structures où sont mises en œuvre ces synergies
- Brosser un état des lieux de la discipline à l'IRD avec une vision sur l'évolution de son positionnement scientifique
- Déterminer quels sont les verrous actuels et les forces de l'IRD pour s'attaquer à ces verrous
- Déterminer les particularités si elles existent de la discipline dans la zone intertropicale et méditerranéenne.

Méthodologie

1. Groupe de travail

Sur propositions des Directeurs d'Unités (Dus), un groupe de travail a été constitué sur des critères de a) diversité des approches, b) diversité des principales composantes de l'hydrologie dans la planète IRD, c) pouvoir rendre compte des différentes prospectives en cours et d) faire un lien avec le Conseil Scientifique de l'IRD. Les membres du groupe de travail ont eu pour mission de représenter la discipline pour leur UMR (liste des membres en annexe 1).

2. Recueil des textes utilisés

Les membres du groupe de travail ont sélectionné et partagé les textes servant de base à l'exercice : rapports, prospectives et articles scientifiques (liste en annexe 2)

3. Pyramide des âges

Pour dresser la pyramide des âges de la discipline en 2018, la liste des ressortissants des CSS1 et CSS5 (chercheurs et ingénieurs de recherche ayant déclaré « hydrologie » en mot clé) a été utilisée.

4. Analyse bibliographique

Deux analyses complémentaires ont été menées :

a) analyse du Web Of Science (WoS)

Une analyse des travaux recensés dans le WoS a été menée 1. Pour déterminer la place de l'IRD au plan national et international. 2. Pour dresser un état des lieux de la discipline au sein des différentes UMRs. Le détail des requêtes peut être trouvé en annexe 3 et a procédé à une sélection par mots clés puis par disciplines WoS sur toutes les années recensées

b) analyse des listes bibliographiques par UMRs disponibles dans le système d'information de l'IRD (DAM). Au sein de chacun des corpus pour chacune des 10 UMRs concernées, ont été sélectionnés les articles dans des revues à comité de lecture (ACL), des années 2017 et 2016 uniquement, puis les titres correspondant à la discipline hydrologie ont été sélectionnés, enfin une analyse des titres par nuage de mots a été menée. Le pourcentage des publications dans la discipline « hydrologie » par rapport au nombre total de publications de l'UMR a été utilisé pour estimer la part des recherches de l'UMR consacrées à l'hydrologie.

5. Analyse des structures

Chacune des UMRs représente des structures très diverses, pour lesquelles la discipline « hydrologie » est représentée par des effectifs très différents et par une place de la discipline au sein des thématiques de l'UMR également différente. L'association et la place de la discipline aux/par rapport autres thématiques des UMRs est représentative de la diversité des points de vue qui s'expriment dans cette analyse. Une analyse des différentes structures (équipes, effectifs pour la discipline « hydrologie » au sein de l'UMR a été menée par l'extraction de données du système d'information de l'IRD (DAM).

6. Questionnaire

Un questionnaire a été élaboré en fonction des objectifs définis. Il comprenait les questions suivantes :

- Question 1 – Quels sont les champs couverts par votre UMR dans le domaine de l'hydrologie
- Question 2 – Quels fronts de sciences identifiez-vous dans votre UMR dans le domaine de l'hydrologie ?
- Question 3 : Est-ce que ces fronts de science concernent des chantiers au Sud ?
- Question 4 : Est ce que les chantiers au Sud de votre UMR ont amené à redéfinir, préciser, avancer (sur) ces fronts de science ?
- Questions 5 : Quelles collaborations sont en cours sur ces chantiers/fronts (disciplines, partenariat national et international) ?

Les membres du groupe de travail ont répondu au questionnaire pour chacune des UMRs. Les réponses au questionnaire ont été synthétisées dans des tableaux partagés sur internet. La structure des tableaux a été discutée lors d'une première réunion du groupe. Les différents tableaux sont représentés en annexe 5.

7. Analyse

D'une manière générale, l'analyse des résultats (corpus bibliographiques, tableaux issus de DAM, ou résultats de l'enquête) ont été traités à l'aide du logiciel libre Gephi 0.9.2. Les méthodes de spatialisation utilisées sont notées dans les légendes des figures représentant chacune des analyses.

Résultats

1. Contexte et enjeux

Le contexte de la discipline le plus contraignant est le conflit potentiel entre les ODDs 2 « Faim zéro », où comment nourrir la planète sous la pression démographique et celle du changement climatique (ODD 13 - baisse des rendements probable en Afrique en particulier sous l'effet du réchauffement global, par exemple), en préservant l'environnement (ODD 15 et 16) et en assurant l'un des services fondamentaux qui est l'accès pour tous à une eau de qualité (ODD6), tout en garantissant l'accès à des énergies renouvelables (ODD 7).

De ce contexte global naissent deux verrous majeurs de la discipline qui sont a) la nécessité de prendre en compte le cycle de l'eau dans l'ensemble de ses compartiments, interactions et rétroactions, b) d'intégrer de manière explicite le rôle des sociétés dans la transformation du cycle de l'eau aussi bien que produire des informations sur les solutions à apporter dans la gestion de l'eau pour préserver les fonctions écosystémiques diverses et les besoins multiples.

2. Place de la discipline à l'IRD dans le contexte national et international

L'effectif de la planète IRD recensé par l'étude et consacré à la discipline hydrologie est composé de 377 chercheurs, ingénieurs de recherche et enseignants chercheurs, dont 28% IRD, 29% universitaires, 17% CNRS, IRSTEA 8%, CIRAD 5%, INRA 3%, CNES 3%, MNHN 1%, autres organismes et écoles 6%.

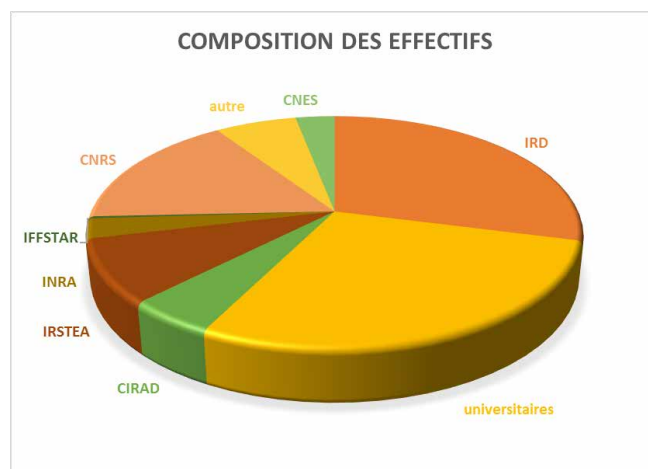


Figure 1 : Effectifs par organismes

Ces effectifs sont répartis dans 11 UMRs

Effectifs par UMRs

[CEREGE](#), [CESBIO](#), [G-EAU](#), [GET](#), [HSM](#), [IGE](#), [LISAH](#) et [IMPMP](#) sont en rattachement principal au département DISCO, [LEGOS](#) à OCEAN et [ESPACE-DEV](#) et [PALOC](#) à SOC.

Nous avons considéré que la discipline « hydrologie » se répartissait dans toutes les équipes des UMRs HSM et G-EAU (voir les structures des différentes UMRs en annexe 5), dans 4 sur 7 équipes pour l'IGE, 3 équipes sur 11 pour l'IMPMP, dans une seule équipe des UMRs GET (sur 9 équipes), LEGOS (sur 5 équipes), CEREGE (sur 4 équipes) et ESPACE-DEV (sur 3 équipes), dans deux équipes sur 3 pour le LISAH, dans les deux équipes du CESBIO sans qu'il soit possible d'identifier les effectifs de la discipline au sein des 2 équipes, dans deux des trois axes de PALOC, avec des effectifs très réduits consacrés à la discipline.

CEREGE	CESBIO	ESPACE-DEV	G-EAU	GET	HSM	IGE	LEGOS	LISAH	IMPMP	PALOC
25	60	21	68	23	65	68	10	17	16	4

La place globale de la discipline pour les 11 UMRs peut être analysée par la part des publications scientifiques la concernant (voir le détail de la méthodologie utilisée plus haut et en annexe 3, et le tableau des données en annexe 6. Deux méthodes différentes ont été utilisées, l'une à partir des listes renseignées par les UMRs dans le système d'information de l'IRD sur seulement deux années (DAM), l'autre à partir du WoS sur toutes les années disponibles.

Les deux analyses sont assez concordantes, sauf pour les UMRs G-EAU et LISAH, soit parce que le pourcentage des publications en hydrologie par rapport aux autres disciplines est variable au cours du temps (seulement deux années pour l'analyse DAM, toutes les années disponibles pour l'analyse WoS), soit parce que la sélection par discipline faite pour l'analyse WoS a été trop sévère pour ces deux UMRs. Cela trace aussi le fait que ces deux UMRs se situent à des frontières de la discipline, comme nous l'analyserons dans le paragraphe « champs couverts ».

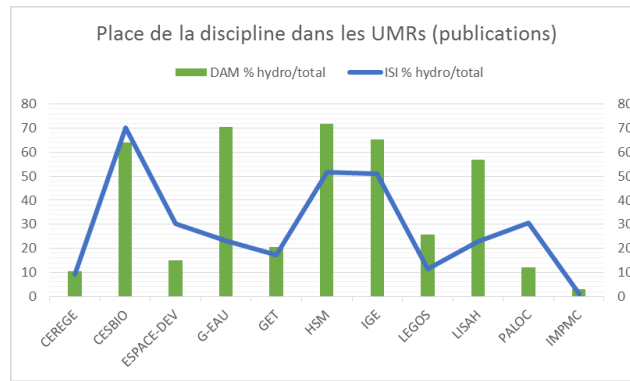


Figure 2 : Place de la discipline « hydrologie » dans les différentes UMRs analysée par le point de vue « bibliographie » ; en ordonnée le pourcentage de publications en hydrologie par rapport au total des publications de l'UMR

Pour la place de l'hydrologie dans les publications des UMRs on doit donc noter une place prépondérante pour les UMRs HSM, G-EAU, CESBIO, IGE et LISAH. Pour le LEGOS, le GET, le CEREGE, ESPACE-DEV, et PALOC, la part de l'hydrologie se situe autour de 10% des publications, plus marginales encore pour l'IMPMC avec 3 à 4% des publications de l'UMR dans le domaine de l'hydrologie.

L'analyse spatiale de la « planète IRD » est représentée figure 3

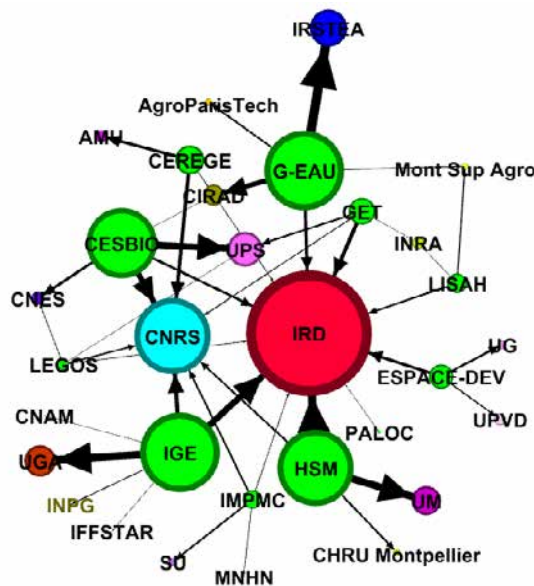


Figure 3 : Analyse spatiale de la « planète IRD ». Effectifs de chacun des organismes pour les différentes UMRs (cercles verts) spatialisés par l'algorithme Yifan Hu. La taille des cercles et des flèches est proportionnelle aux effectifs.

La part des publications françaises en hydrologie représente 4,25% de la production mondiale. Le CNRS arrive à la troisième place des organisations participant au corpus mondial en hydrologie, et l'IRD à la 24^{ème} place. Dans les publications françaises, l'IRD représente un peu moins de 14% de la production scientifique, derrière le CNRS (42%) et devant l'INRA (11%) et IRSTEA (9%) (Fig. 4).

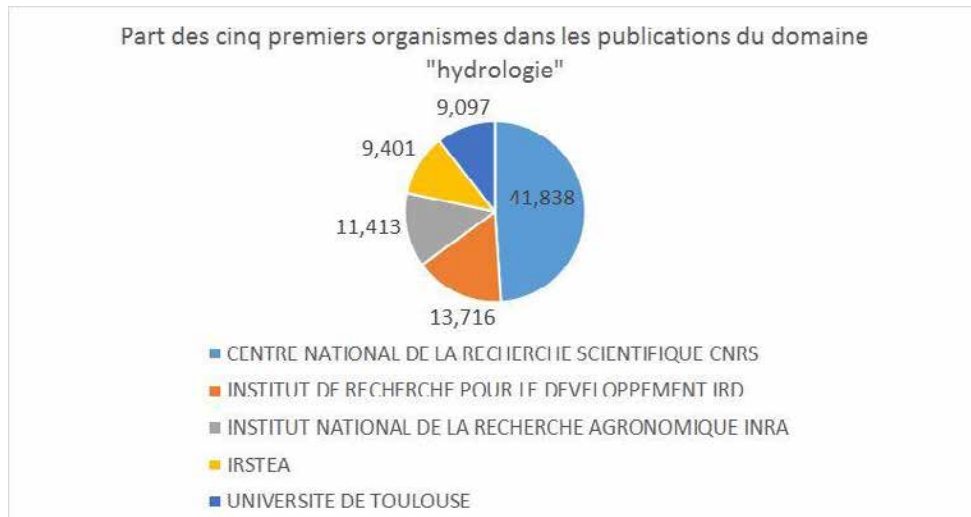


Figure 4 : Part des publications des cinq premiers organismes publiant dans le domaine de l'hydrologie

3. Etat des lieux de la discipline à l'IRD

a) effectifs et pyramide des âges

L'effectif IRD dans les 10 UMRs analysées compte 105 personnes dont 76 chercheurs (DR et CR). La pyramide des âges des chercheurs (DR et CR) est représentée figure 7. La discipline présente un très fort déséquilibre de genre, et plus de la moitié de l'effectif a plus de 50 ans.

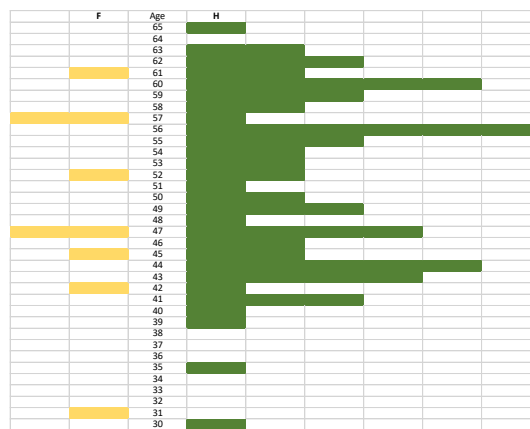


Figure 5 : Pyramide des âges des chercheurs de la discipline

b) Champs couverts

Comme pour la plupart des points traités dans cette note, les champs de la discipline couverts par la planète IRD ont été analysés de deux façons différentes i) par l'analyse de la bibliographie ii) par les réponses du groupe de travail au questionnaire.

L'analyse de la bibliographie a été faite à son tour de deux façons différentes, l'une à partir de la base de données du WoS, l'autre par le système d'information de l'IRD (voir plus haut et les détails des requêtes en annexe 3).

- **Analyse du WoS**

La première analyse porte sur le corpus de texte sélectionnés globalement (toutes les publications portant sur l'hydrologie, puis les publications françaises, puis les publications de l'IRD – voir le paragraphe méthodologie). Sur cette sélection globale, l'analyse des disciplines du WoS représentées dans les publications de l'IRD dans le domaine de l'hydrologie est présentée figure 6.

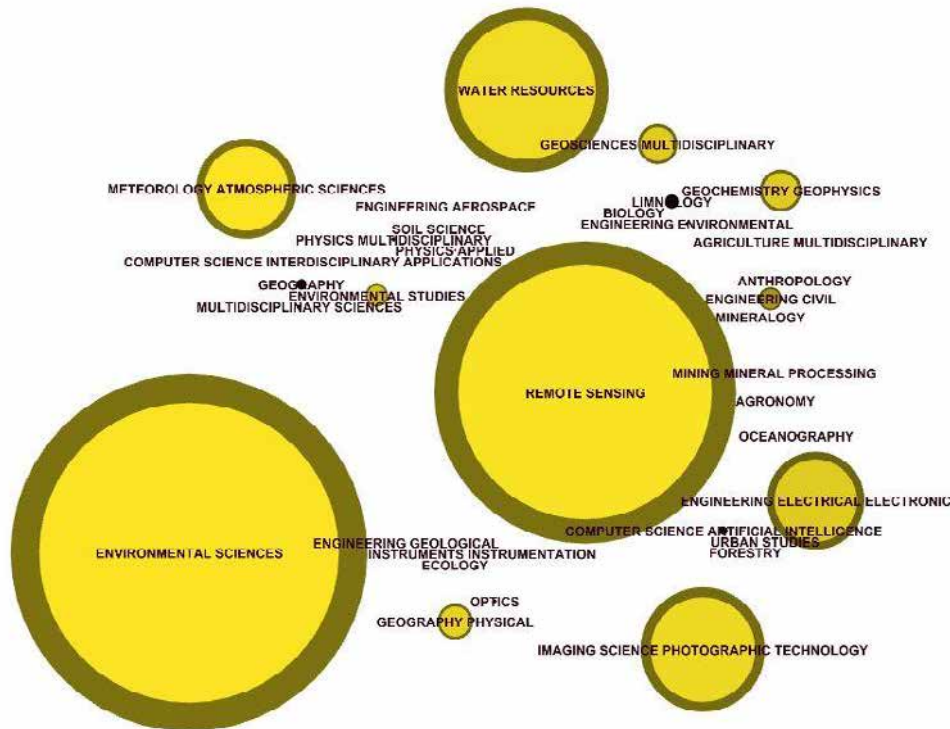


Figure 6 : Analyse des disciplines du WoS représentées dans les publications de l'IRD en hydrologie. Algorithme de spatialisation Fruchterman Reingold, Gephi 0.9.2.

Par ordre d'importance (en nombre de publications), on trouve les rubriques «*Environmental Sciences*», «*Remote Sensing*» et en troisième place «*Water Resources*». Les rubriques «*Meteorology Atmospheric Sciences*», «*Geosciences Multidisciplinary*», «*Geochemistry Geophysics*» et «*Geography Physical*» occupent des places secondaires mais néanmoins significatives. Le nombre des publications dans le domaine «*Remote Sensing*» est renforcé par les rubriques «*Engineering Electrical Electronic*» et «*Imaging Science Photography Technology*».

La deuxième analyse du WoS porte sur les champs couverts par les UMRs de l'IRD identifiées dans la discipline. Elle est présentée Figure 7. L'analyse spatiale porte sur les champs disciplinaires du WoS représentés dans le corpus de publication de chacune des UMRs, restreint à la discipline principale «*Water Resources*». Cette analyse spatiale représente donc les sous-disciplines les plus importantes en nombre de publications se rapportant au domaine de l'hydrologie au sens large pour chacun des laboratoires.

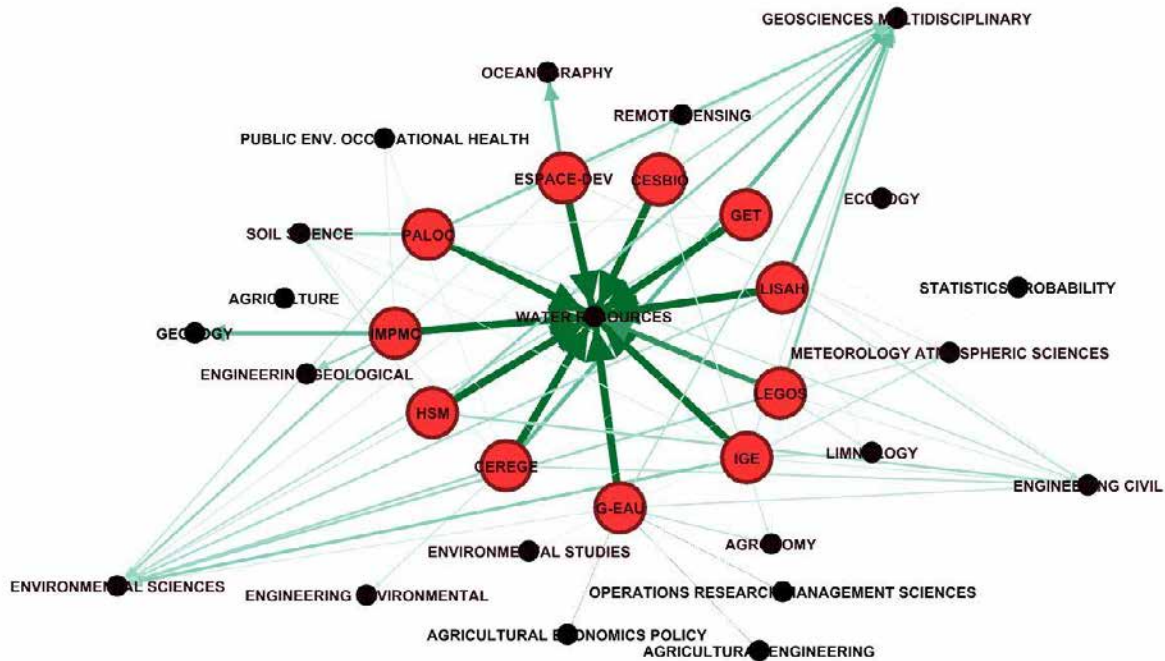


Figure 7 : Cartographie des disciplines les plus représentées dans les corpus WoS des différentes UMRs dans le champ de l'hydrologie. Algorithme Yifan Hu.

Les disciplines qui ont le plus de liens (hors water resources) avec l'ensemble des nœuds représentant les UMRs (cercles rouges) sont « Environmental Sciences », et « Geosciences Interdisciplinary », ce qui représente assez bien le positionnement de la planète IRD dans la discipline « Hydrology ». A un deuxième niveau, « Soil Science » et « Meteorology Atmospheric Sciences » organisent une deuxième partition des UMRs.

- **Analyse des publications référencées dans le système d'information de l'IRD (DAM)**

Une autre façon d'appréhender les spécificités et champs communs des laboratoires est l'analyse des titres des publications ACL listées dans DAM pour les années 2016 et 2017. L'ensemble des nuages de mots résultant de cette analyse sont présentés Figure 9.

L'ensemble des UMRs a en commun les mots «River», «Water», «Model » et « Hydrology ». CEREGE, GET, HSM, IGE et CESBIO ont en commun le mot «Earth», HSM, IGE et CEREGE partagent le mot «Climate» ou «Climat». Le LISAH, le GET, IGE, HSM et CESBIO ont en commun le mot «Soil».

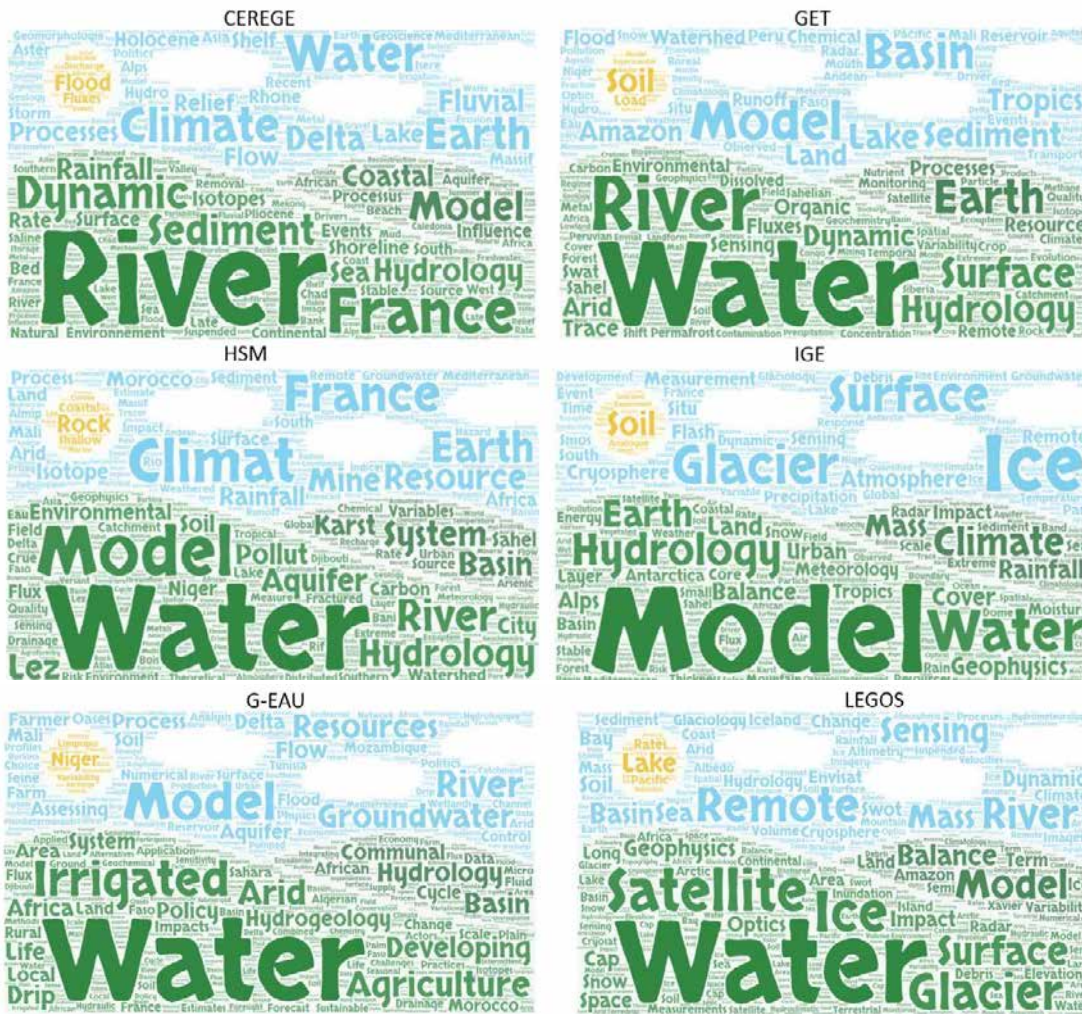


Figure 9-1 : Nuages de mots issus de l’analyse des titres des publications ACL 2016 et 2017 déposées dans DAM pour les 6 UMRs centrées sur la discipline « hydrologie » ou pour lesquelles au moins une équipe est centrée sur la discipline « hydrologie »

Toutes ont également des mots spécifiques :

- CEREGE : Aster, Isotopes, Coastal, Delta, Sediment, Shelf, Holocene, Shoreline, Aquifer
- GET: Organic, Fluxes, Runoff, Sediment
- HSM: City, Karst, Pollution, Aquifer, Mine
- IGE: Glacier, Ice, Extreme, Geophysics
- LEGOS: Glacier, Ice, Lake, Geophysics, SWOT, Cryosphere
- CESBIO: SMOS, Urban, Surface, Product, Moisture, Snow
- LISAH: Hydraulic, Map, Ditch, Agricultural, Heat, Management
- PALOC: Participative, Delta, Knowledge, Coastal, Power, Local, Political, Observatoire
- ESPACE-DEV: Coastal et Côtiers, Cyclone, Hazards, Solar
- IMPMP : Acid, Arsenic, Mine, Drainage, Trace, Metal



Figure 9-2 : Nuages de mots issus de l'analyse des titres des publications ACL 2016 et 2017 déposées dans DAM pour les 5 UMRs qui ont des spécificités marquées en « hydrologie ».

Les références géographiques apparaissant dans les mots clés sont pour chacune des UMRs :

CEREGE : Africa, Mediterranean, Alps, Rhône, France, Chad

GET: Peru, Tropics, Amazon, Mali, Sahel, Arid, Permafrost, Sahelian

HSM: Lez, Morocco, Mediterranean, Sahel, Niger, Arid

IGE: Alps, Tropics, Antarctica

CESBIO: Arid, Morocco, Chile, Lisah, Mediterranean

G-EAU: Niger, Mali, Mozambique, Morocco, Africa, Mali, Oases, Tunisia

LEGOS : Amazon, Iceland, Africa

ESPACE-DEV : Vanuatu, Tropical, Guiana, Amazon

LISAH: Mediterranean

PALOC: Niger, Tanzanie, Kenya

IMPMC : Calédonie

Cette analyse des titres de publications permettent déjà d'identifier les spécificités thématiques et géographiques de chacune des UMRS, ainsi que les champs communs à toutes.

- **Analyse de la première question du questionnaire commun : « Quels sont les champs couverts par votre UMR dans le domaine de l'hydrologie »**

Les réponses à la première question posée à l'ensemble des UMRS ont été synthétisées dans des tableaux partagés par le groupe. L'ensemble des tableaux est présenté en annexe 5. L'analyse spatiale des tableaux synthétisant les réponses va permettre d'affiner l'exercice commencé avec l'analyse des publications.

L'analyse des domaines d'application de la discipline présentée Figure 10 permet de distinguer deux grands domaines : semi-aride et littoral-mer. Le premier regroupe GET, HSM, IGE, CESBIO, G-EAU, LISAH, CEREGE, tous liés au domaine semi-aride, alors que PALOC, LEGOS et IMPMC sont liés au domaine littoral-mer, ESPACE-DEV est dans une position intermédiaire puisque l'UMR travaille sur les deux domaines. Les autres domaines créent des sous-groupes dans ces deux grands groupes : Bassin Versant anthropisé (GET, HSM, IGE, G-EAU et IMPMC), montagne (IGE et CESBIO), milieu agricole (CESBIO et LISAH),

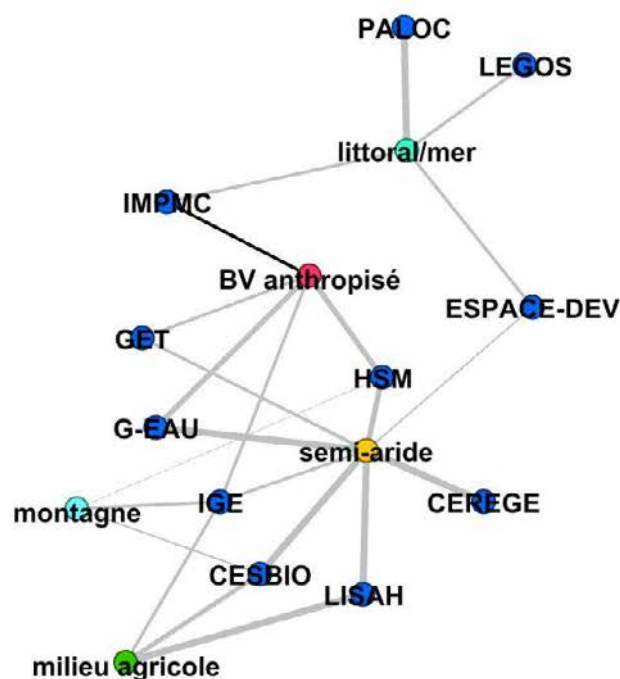


Figure 10 : Analyse spatiale des domaines d'application des UMR. Algorithme Yifan Hu, Gephi 0.9.2.

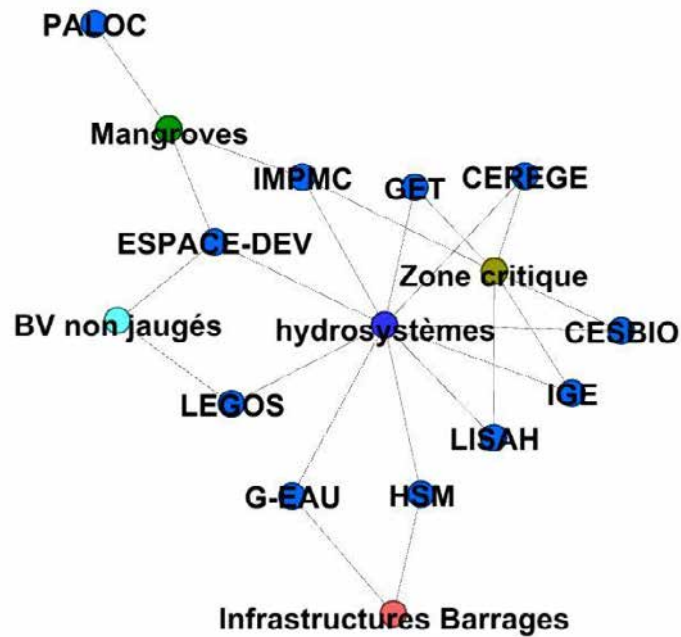


Figure 11 : Analyse spatiale des objets d'étude des UMRs ; Algorithme Yifan Hu, Gephi 0.9.2.

Pratiquement toutes les UMRs, de façon non surprenante, se retrouvent sur l'objet «*hydrosystèmes*» qui comprend les rivières mais aussi les lacs et zones d'inondations, le second objet d'étude par nombre de liens et l'objet «*zone critique*» qui correspond à une évolution de la discipline «*hydrologie*» comme on le verra dans la partie fronts de sciences, qui est passée d'une étude des hydrosystèmes à une vision plus intégrative de la surface continentale, et des objets plus marginaux comme les mangroves (domaine littoral), les infrastructures hydrauliques et les barrages principalement en domaine agricole, et les bassins non jaugés.

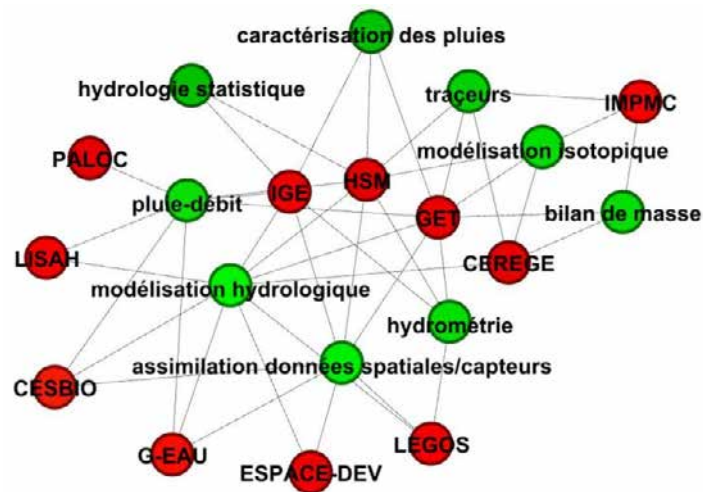


Figure 12 : Analyse spatiale des méthodologies investies par les UMR. Algorithme Yifan Hu, Gephi 0.9.2.

La méthodologie la plus centrale qui lie pratiquement toutes les UMRs est la modélisation (mot clé qui sort aussi très fortement de l'analyse des publications), avec des variantes qui distribuent les UMRs à la périphérie du thème modélisation: la plus partagée est l'assimilation de données spatiales et capteurs, puis modélisation pluie-débit, modélisation statistique et analyse de précipitations, modélisation isotopique et hydrométrie.

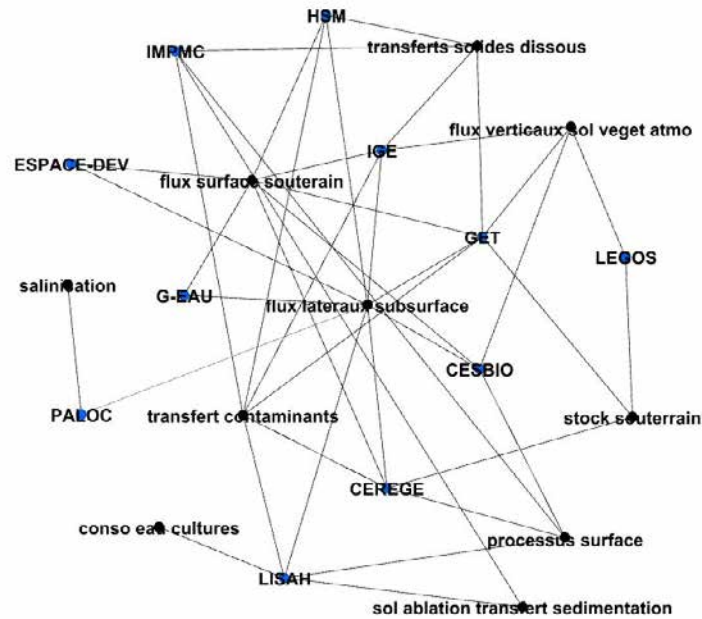


Figure 13 : Analyse spatiale des processus étudiés par les UMRs. Algorithme de spatialisation Fruchterman Reingold, Gephi 0.9.2.

Le processus le plus étudié par la planète IRD porte sur les transferts latéraux de surface et de subsurface, suivi par les transferts surface-souterrain, les transferts de contaminants, puis par les flux verticaux surface sol-végétation-atmosphère, l'estimation des stocks d'eau souterrains, les transferts solides et dissous, et les processus de surface, enfin un investissement plus marginal sur érosion (sol, ablation, transfert, sédimentation), sur la consommation en eau des cultures, et sur la salinisation (eau et sols).

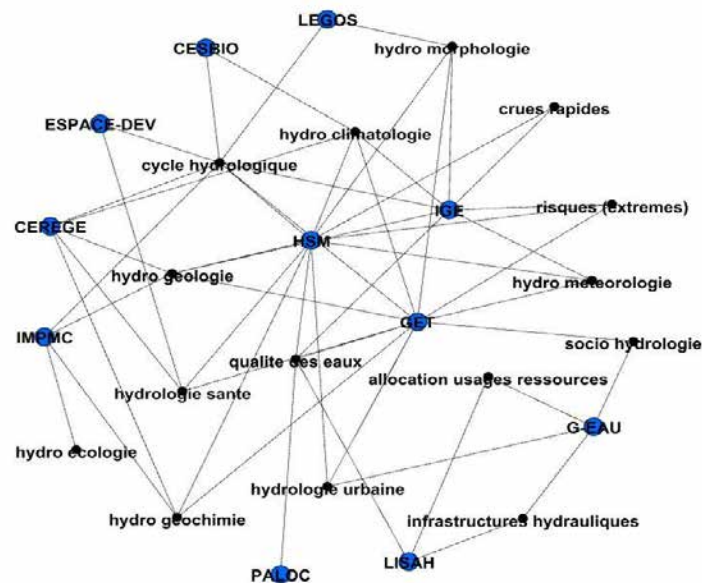


Figure 14 : Analyse spatiale des sous-disciplines de l'hydrologie. Algorithme de spatialisation Fruchterman Reingold, Gephi 0.9.2.

L'analyse spatiale met en évidence un premier cercle de sous-disciplines : Etude du cycle hydrologique, hydro climatologie, hydrologie-santé, qualité des eaux et hydrogéologie, un second cercle constitué

de hydro géochimie, hydro météorologie, hydro-morphologie, crues rapides, événements extrêmes et hydrologie urbaine, hydro-sociologie, allocation des ressources et infrastructures hydrauliques.

c) Analyse de la répartition géographique de la discipline : chantiers, systèmes nationaux d'observation (SNO), instruments au Sud de l'IRD (Laboratoires Mixtes Internationaux - LMI, Jeunes Equipes associées – JEAI, Groupement de Recherche Internationaux – GDRI-Sud)

Pour terminer cet état des lieux de la discipline, il est important d'avoir une vision géographique du déploiement de la discipline. Ce déploiement géographique est très lié aux grands domaines d'application (voir Figure 10) mais fait évoluer cette vision en ajoutant le domaine « *grands bassins équatoriaux* » qui émerge de l'analyse géographique bien que n'ayant pas été mis en valeur par les résultats de l'enquête.

- **Milieu agricole, bassins versants anthropisés, Sud Méditerranée, Inde, Afrique de l'Ouest:**

Sur ces deux domaines qui sont souvent joints au niveau géographique, on peut lister les chantiers de G-EAU en Tunisie et Maroc, du CESBIO au Liban et Maroc, du LISAH au Maroc, en Tunisie, et au Liban, le chantier Systèmes Aquifères du CEREGE en Algérie et Tunisie, le chantier bassin versant et systèmes lacustres du CEREGE au Maroc, le **GDRI O'LIFE** récemment créée au Liban dans la suite d'un LIA, le **LMI NAILA** en Tunisie et **TREMA** au Maroc, la **JEAI JEENS** en Algérie, l'**Observatoire OMERE** en Tunisie et **OSR-Tensift** au Maroc, le chantier d'HSM sur la lagune d'Enghien en Côte d'Ivoire, la partie continentale du **LMI CEFIRSE** (Inde) et la partie indienne de l'**observatoire BVET**

- **Littoral, Afrique de l'ouest (et centrale) et Asie du Sud Est, Océan Indien, débuts en Méditerranée**

Sur ce domaine, on compte les chantiers Vietnam et Bengladesh du LEGOS, le chantier Vietnam de l'IGE, les chantiers Benin, Cameroun, Gabon, et Togo du Cerege, Sénégal et Océan Indien pour PALOC, et Gabon et Océan Indien pour ESPACE-DEV, le **LMI CARE** sur le delta du Mekong, la partie Inde du Sud du **LMI CEFIRSE**, un début d'investissement sur ce thème en Méditerranée avec le **LMI COSYSMED** en Tunisie et un nouvel axe du **GDRI O'LIFE**

- **Semi-aride, zone sahélienne et soudano-sahélienne Nordeste Brésilien et Altiplano Bolivien**

Un investissement ancien et central de l'IRD sur les zones arides, avec les chantiers de l'IGE, d'HSM, du GET et de PALOC en Afrique de l'Ouest, le **LMI** en création **NEXUS** sur le nexus « eau, agriculture, énergie », le **LMI REZOC** et surtout l'**observatoire AMMA-CATCH**, le chantier système aquifère du CEREGE au Tchad, le chantier bassin versant et systèmes lacustres en zone semi-aride du CEREGE au Tchad, Benin, et Nord Cameroun, le chantier Lac Tchad du LEGOS, les chantiers bassins versants et lacs dans le Nordeste Brésilien et altiplano Bolivien d'ESPACE-DEV, la **JEAI TITICACA**.

- **Montagne, Andes et Népal**

Ce domaine compte les chantiers lacs andins du LEGOS (Chili), les chantiers Andes et Népal de l'IGE, Népal d'HSM, le GDRI O'Life (anciennement observatoire de la neige) au Liban, le LMI GREATICE, la JEAI HIMALICE, l'observatoire GLACIOCLIM.

- **Grands bassins équatoriaux**

Ce domaine émerge de l'analyse géographique, avec les chantiers Amazonie du LEGOS, du GET - **observatoire HYBAM** (Amazonie, Orénoque et Congo), et d'ESPACE-DEV – **LMI OCE**, le Tonlé Sap au Cambodge de G-EAU, le **LMI DYCOFAC** sur le bassin du Congo, avec la partie (petit bassin) de l'**observatoire BVET** au Cameroun.

d) Politique de site

La discipline hydrologie est répartie sur plusieurs sites en France. Tant en termes d'effectif global que de la place de la discipline dans les UMRs, les sites de Montpellier, Toulouse et Grenoble sont prépondérants. L'OSU de Grenoble (OSUG) regroupe les observatoires GLACIOCLIM et AMMA-CATCH, l'Observatoire Midi-Pyrénées groupe les observatoires HYBAM et BVET et également le CTOH qui distribue les données d'altimétrie radar dont une partie concerne les hauteurs d'eau des rivières et des lacs. Le CNES a également un fort impact sur la structuration des entités toulousaines de la planète IRD sur les aspects assimilation de données spatiales et sur leur investissement dans les applications des missions innovantes dans le domaine de l'eau (SWOT, SMOS par exemple). La discipline « hydrologie » est au cœur de la « key initiative » WATERS de l'i-site MUSE, et une partie non négligeable de l'accès aux images distribuées par DINAMIS, le centre de distribution d'images à haute et très haute résolution de l'IR Système Terre, et aux services du pôle THEIA Surfaces Continentale, hébergés à la Maison de la Télédétection, à Montpellier. A Montpellier également, l'i-site MUSE a une key initiative « WATERS », la discipline est visible au travers de l'Institut Montpellierain des Sciences de l'Eau (IM2E), et du Centre Unesco de niveau II sur l'eau.

4. Evolution de la discipline à l'IRD

L'évolution de la discipline à l'IRD peut être analysée à partir de deux textes (voir annexe 2) : « Les disciplines scientifiques à l'IRD », et « L'Hydrologie de Surface à l'Orstom-IRD ». En 2013, l'hydrologie comptait 7,8% de l'effectif chercheur, avec 57 chercheurs, dont 50 hommes et 7 femmes (12% de femmes) et une moyenne d'âge de 47 ans. Aujourd'hui on compte un effectif de 76 chercheurs, répartis dans les commissions scientifiques 1 et 5, ce qui représente à peu près la même proportion en termes d'effectif qu'en 2013 (9%), une moyenne d'âge de 50 ans, et 9 femmes pour 67 hommes (11% de femmes), donc un relatif vieillissement et un rapport de genre qui ne s'est pas amélioré.

Au niveau des disciplines, le rapport de 2013 comptait 7 sous-disciplines (hydrologie générale, hydroclimatologie, hydrogéologie, hydrologie, hydrogéologie, hydrosédimentologie, hydrochimie, glaciologie), il semble donc que la discipline se soit diversifiée.

Le petit texte sur l'hydrologie de surface à l'IRD fait un historique de la discipline et note une évolution marquée d'une sciences de l'ingénieur, vers une science de l'environnement, qui va s'ouvrir à la pluridisciplinarité dans les années 70, ce qui fait écho à l'évolution globale (et mondiale) de la discipline que nous verrons au chapitre sur les fronts de science, mais ce qui laisse déjà entrevoir que l'IRD a accompli la même évolution que l'évolution de la discipline en général, peut-être même précocement.

5. Fronts de Science

a) identifiés par les UMRs

Les fronts de science identifiés par les UMRs se divisent en des verrous thématiques et des verrous méthodologiques

- **Verrous thématiques**

- *Cycles de l'eau – échelles temporelles et spatiales*

Une approche multi-échelle à la fois spatiale et temporelle est nécessaire pour comprendre « les cycles de l'eau » ; l'évolution des hydro systèmes en lien avec les variations passées du climat reste en grande partie méconnue, les évolutions à moyen terme, l'exploration à plus long terme des points de bascule, de la non stationnarité des systèmes et des changements de régime dans les éco hydro systèmes est un verrou important compte tenu des interactions et retro actions complexes qui en sont les causes. Déterminer les parts respectives de la variabilité climatique et des activités anthropiques dans

l'évolution des différents réservoirs nécessite également de pouvoir appréhender les systèmes à différentes échelles ainsi que leurs interrelations. L'accélération du cycle de l'eau sous ces deux pressions combinées appellent à comprendre les causes complexes de cette accélération, afin de pouvoir agir sur son ralentissement. Accroître la part de l'eau s'infiltrant dans le sol jusqu'à sa capacité en situation « naturelle » aura un impact direct sur la fréquence et l'intensité des épisodes d'inondation (aussi bien en zone tempérée qu'en zone tropicale). Les causes complexes de ces extrêmes climatiques, aussi bien inondations que sécheresse, ou de leur augmentation en fréquence et en termes d'impacts constitue également une question ouverte. La coévolution des systèmes hydro-climatiques et des sociétés a des conséquences sur la santé qui restent à explorer en grande partie, aussi bien sous l'angle épidémiologique des maladies à vecteur que sous l'angle des pollutions (ruissellement-transport-pollutions/bactéries-risques sanitaires). La caractérisation des flux et de leur qualité (transports solides et dissous, contaminants) depuis les têtes de bassins versants jusqu'à l'océan reste une mesure importante de cette coévolution.

- Processus aux interfaces

Il reste beaucoup de verrous scientifiques dans les fonctionnements aux interfaces i) surface/sub-surface : Rôle des couverts complexes (fréquents en zone semi-arides) sur la partition entre évaporation, évapotranspiration, infiltration, ruissellement, rétroaction des surfaces continentales sur le climat, Nexus eau-énergie-agriculture ii) surface/souterrain : Apports d'eau d'irrigation en zone semi-aride, iii) littoral : Vulnérabilité des nappes d'eau douce, compréhension de la variabilité spatio-temporelle de la salinité des estuaires inverses.

- Domaines spécifiques : hydrologie urbaine et hydrologie de montagne

Les deux domaines de la ville et de la montagne causent des déclinaisons spécifiques de ces questions générales. En hydrologie urbaine, le lien entre les petits cycles (typiquement urbains) et les grands cycles hydrologiques (exemple pollution des rivières par les rejets urbains), ou les inondations dans le tissu urbain par les fleuves en crue avec leurs conséquences sur les populations, sur le traitement des eaux, etc...) sont des questions actuelles. De même dans le domaine de l'hydrologie de montagne, l'évolution des régimes hydro-glaciaire, la caractérisation des processus d'ablation/accumulation et l'évolution des masses glaciaires sont des thèmes de recherche.

• **Verrous méthodologiques**

- Données spatiales : l'explosion de la quantité et de la qualité des données d'observation spatiale a amené de nouveaux fronts de sciences dans la discipline

L'utilisation intensive des observations de télédétection ouvre la possibilité de spatialiser des processus climatiques et hydro-éco-climatiques en contexte peu ou pas jaugé, avec beaucoup de questions de sciences non résolues : nouveaux schémas de modélisation du cycle hydrologique (flux, stocks, forçages) contraint par des données spatiales multi-capteurs, assimilation d'observations pour le offline (calage, ré-analyse) ou le on-line (correction et prévisions temps réel), caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols par modélisation inverse, nécessité de développements méthodologiques autour de l'imagerie altimétrique et l'information 3D (SWOT),

Outre les capacités à spatialiser, les observations spatiales sont des mesures dont beaucoup restent à valider et calibrer par rapport à d'autres mesures (mesures de différents capteurs spatiaux ou mesures in situ), ou par rapport avec des sorties de modèles. De nombreux progrès ont été faits dans ce domaine, on peut noter à titre d'exemple des études à mener en ce qui concerne

*L'équivalent en eau du manteau neigeux

* L'évapotranspiration en zone de relief, en particulier pour lever une forte équifinalité des modèles (évapotranspiration/infiltration profonde)

* Les transferts latéraux en régime intermittent

* La caractérisation physique des surfaces (type de culture, organisation 3D, rugosité,...) ; cette caractérisation nécessite des approches par télédétection multi-longueur d'onde à haute répétitivité

Dans beaucoup de cas où les données d'observation spatiale ont été calibrées et validées, il est nécessaire de générer des produits « hydrologiques » de qualité, inter calibrés, ainsi que des indicateurs dérivés des différentes sources de télédétection, afin de faciliter et standardiser l'intégration de ces mesures et indicateurs dans des modèles. On peut citer les produits d'évapotranspiration, de précipitations ; d'étendue et de hauteurs des eaux de surfaces ; d'humidité du sol ; de stock d'eaux souterraines ; d'irradiation solaire. Dans beaucoup de cas il est nécessaire d'améliorer la continuité et la cohérence des séries temporelles spatiales (altimétriques, gravimétriques, observations des eaux de surface).

Enfin, on peut noter un besoin d'assimilation de données spatiales dans une plateforme de modélisation intégrée de la zone critique (interactions surface-souterrain - milieu karstique notamment, surface-atmosphère, surface-végétation), en particulier en milieu agricole. L'intégration de données spatiales avec des mesures de traceurs géochimiques et isotopiques est l'un des verrous importants dans ce domaine.

- Domaine de l'hydrologie urbaine

Un grand nombre de verrous méthodologiques existent dans ce domaine spécifique

- * Modélisation hydrologique et hydraulique (modèle macroscopiques à porosité) adaptée aux temps rapides de calcul requis
- * Estimation des précipitations aux échelles urbaines
- * Fouille de données textuelles adaptés aux phénomènes étudiés, fusion d'observations multi-sources/multi-format, ou apport de la télédétection spatiale à très haute résolution spatiale
- * Interface surface/souterrain pour quantité et qualité (transfert des contaminants)

- Hydrologie de montagne

De la même façon, dans le domaine de l'hydrologie de montagne le principal verrou identifié par la communauté de la discipline « hydrologie » de l'IRD concerne la mesure des précipitations en zone de (haute) montagne.

- Le domaine agricole, en particulier en zone semi-aride présente également des verrous spécifiques identifiés par la communauté

- * Ruissellement / infiltration i) sur des surfaces hétérogènes (labours, encroûtements) et ii) via des éléments discontinus (ravines, banquettes antiérosives, fossés, fentes de retraits).
- * Échanges entre aménagements (fossés, banquettes, lacs) et aquifères sous-jacents.
- * Évapotranspiration i) en zone de relief collinaire avec couplage topographie / direction du vent et ii) sur des couverts discontinus en rang ou stratifiés

- Mesures et caractérisation des objets

Dans le domaine de l'hydrométrie, le débit des sources karstiques et des rivières en milieu karstique reste un verrou, de même la caractérisation de la dynamique du couvert végétal, ainsi que la combinaison de différentes mesures : ruissellement, piézométrie, météorologie, traçage. Dans ce dernier domaine la combinaison de données issues de différentes méthodes : capteurs en télédétection à fine résolution spatiale, capteur en proxy détection, méthodes géophysiques reste un verrou méthodologique. Des schémas de mesures in situ prenant en compte la variabilité spatiale à plusieurs échelles reste un défi pour pouvoir les intégrer par des méthodes géostatistiques pour créer

des couvertures larges (nécessaire dans bien des cas pour la validation de données spatiales). Dans ce domaine, des méthodes d'agrégation des différents types d'érosion (aréolaire / ravinaire / par glissement de terrain), ainsi que la contribution de chacun des types dans la dégradation des sols et dans l'envasement des retenues d'eau sont des questions ouvertes. Il est nécessaire d'avancer sur les mesures issues de nouveaux capteurs pour l'hydrologie, sur la connexion des capteurs ainsi que sur l'utilisation de mesures opportunistes. Enfin, pour permettre aux modèles de tirer parti des nouvelles mesures disponibles, il est indispensable de consacrer des efforts de recherche sur la gestion de ces observations, en tirant parti des avancées en sciences des données.

- Modélisation

En ce qui concerne la modélisation il est à noter le besoin de développer des outils génériques de modélisation, de rétro-modélisation, d'inférence et de caractérisation dynamique adaptés aux comportements hydrologiques non-linéaires, dans une approche système complexe. D'autre part il est essentiel de pouvoir paramétrer de façon parcimonieuse pour pouvoir prendre en compte un grain spatial fin sur une large extension spatiale (conf. apport nouveaux des données d'observation spatiale). Il est nécessaire également pour pouvoir prendre en compte ces nouvelles mesures de développer des procédures numériques permettant un calage rapide et précis. Dans certains cas l'identification (si elles existent) des lois de changement d'échelle pour les principaux paramètres hydrodynamiques pourrait permettre l'intégration dans les modèles de mesures à différentes échelles (in situ - spatiales). Le couplage de différentes méthodes mathématiques devrait permettre de mieux prendre en compte les processus complexes : méthodes statistiques pour certains paramètres couplées avec les équations différentielles traditionnellement utilisées pour caractériser les écoulements ou les diffusions, méthodes topologiques pour le découpage de l'espace et traiter les connectivités, théorie des graphes pour traiter les arborescences. Les méthodes de l'intelligence artificielle doivent aussi être explorées dans le nouveau contexte d'afflux de données de sources diverses, comme la découverte de motifs ou de structures dans les données massives, mais aussi les raisonnements sur les données incertaines, incomplètes ou bruitées. Cependant, les schémas numériques doivent aussi être optimisés pour prendre en compte les processus complexes, en particulier aux interfaces.

- Interfaces

Enfin il reste de nombreux verrous aux interfaces des différents compartiments du cycle hydrologique

- * Couplage végétation / hydrologie de surface / hydrologie de sub-surface : quelles variables doit on prendre en compte dans le couplage et selon quels grains spatial et temporel.

- * Couplages à l'interface Sol-Végétation-Atmosphère entre les cycles énergétique, hydrologique et biogéochimique (carbone, azote, ...).

- * Quantification des ressources en eau souterraine et de la recharge

- * Rôle de l'humidité du sol dans les échanges gazeux verticaux

- Hydrologie opérationnelle

Les avancées réalisées ces dernières années doivent se traduire dans le domaine de l'hydrologie opérationnelle, pour la formalisation de scénarios de gestion, et dans le domaine de l'allocation des ressources. Dans ce dernier domaine, la désagrégation de tendances régionales, les grands systèmes aquifères transfrontaliers ainsi que l'emploi de protocoles participatifs restent autant de défis.

b) Exercices de Prospective

Nous retiendrons des différentes prospectives qui ont servi de cadre à cette note (voir annexe 3) les éléments suivants :

- **Il est impératif d'intégrer le socio-écosystème:** Dans la prospective INEE « *Compréhension et modélisation des socio-écosystèmes : Si le changement climatique a un impact direct sur la disponibilité de la ressource et le fonctionnement des écosystèmes, ses effets se trouvent amplifiés ou atténués selon les dynamiques sociales et territoriales (occupation des sols, démographie, qualité de vie et usages) et les choix de gouvernance (maîtrise du foncier, gestion des risques, choix d'instruments économiques, impact des lobbyings) qui s'y rattachent* »; Dans la prospective INSU Surfaces et Interfaces Continentales « *il est nécessaire d'intégrer spécifiquement l'homme de manière directe (ex: prise en compte des pratiques agricoles) ou indirecte (ex : flux de polluants) dans nos études en prenant notamment en compte les boucles de rétroaction quand c'est nécessaire (ex. pour la gestion quantitative de l'eau)* ».
- **Au début de la dernière décennie, naissance du concept de zone critique : explicitement au** centre de la prospective INSU SIC et adopté pour la première fois en 2001 (NRC report entitled Basic Research Opportunities in Earth Science), le concept est né au sein de la communauté des sciences de la terre (géologie, écologie, pédologie, météorologie, géomorphologie et hydrologie) en réponse au **besoin de comprendre la réponse des processus de surface aux perturbations climatiques et anthropiques**. La zone critique contrôle la fonction hydrologique et en retour, l'eau contrôle les processus physiques, chimiques et biologiques qui modifient la structure de la zone critique. Sa structure pourrait être un héritage de l'histoire tectonique et climatique et ne pas être en équilibre avec les forçages actuels. Les perturbations anthropiques changent le comportement de la zone critique vis-à-vis des nutriments, d'un système transformant vers un système simplement transportant (CZO white booklet). L'intégration des différents compartiments de la zone critique implique de relier entre eux par exemple les compartiments sol/plante/atmosphère, le continuum terre-mer ou la surface/sub-surface (approche intégrée, prospective INSU-SIC). Les régions tropicales, la cryosphère et le milieu urbain sont des zones d'étude prioritaires de la zone critique (SNO, prospective INSU-SIC).
- **Evolution des stratégies d'observation :** La communauté des Surfaces et Interfaces Continentales doit faire évoluer ses **stratégies d'observation**, notamment en lien avec les nouvelles missions spatiales, et renforcer son expertise scientifique en s'ouvrant vers d'autres communautés scientifiques pour développer des outils innovants tant sur l'observation que sur le **traitement et la modélisation des variables d'intérêts**. (méthodes telles que le traitement du signal, les analyses statistiques, les méthodes d'assimilation, le cloud computing, le data mining, l'interopérabilité des données hétérogènes, la représentation 4D du système étudié) (approche intégrée, prospective INSU-SIC)
- **La modélisation comme un support d'intégration :** La communauté doit penser la modélisation comme un support d'intégration des connaissances et d'interdisciplinarité et développer des plateformes de modélisation ouvertes et évolutives pour la recherche mais aussi visant à être opérationnelles pour le monde socio-économique. (approche intégrée, prospective INSU-SIC)
- **Intégration des processus biotiques-abiotiques :** Il est important d'analyser les contributions respectives et les interactions des processus d'origines biotiques, abiotiques et impacts anthropiques sur les variables d'intérêts (ex. quelle est la part des processus microbiens, du climat et de l'action de l'homme sur les émissions de gaz à effets de serre du sol ?) (approche intégrée, prospective INSU-SIC)
- **Importance de comprendre les relations réseaux trophiques et flux d'éléments majeurs :** Il est important de comprendre les relations réciproques entre le fonctionnement des réseaux

trophiques et les flux d'éléments majeurs, mais aussi la façon dont ces relations affectent l'évolution des espèces et la structure des communautés (Prospective INEE).

- **Le régolithe comme lieu privilégié des échanges eau-sol-vivant.** Dans le régolithe, les temps de résidence de l'eau, des éléments chimiques, dont les contaminants, peuvent atteindre plusieurs décennies nécessitant, de fait, des observations à long terme. Le régolithe étant un milieu très hétérogène, l'observation doit s'appuyer sur une caractérisation fine de la structure physique et de la composition chimique de ce compartiment, ainsi que de la structuration des organismes vivants vers la profondeur (SNO, prospective INSU-SIC).
- **Emergence des problématiques environnement-santé:** i) le suivi de certains contaminants chimiques (pesticides, hydrocarbures, métaux) ou de certains organismes responsables de maladies infectieuses (agents du paludisme, de la dengue, du chikungunya,...) a débuté, ii) importance de la diversification des objets d'études et des problématiques (antimicrobiens et antibiorésistance, perturbateurs endocriniens, pathogènes émergents) (SNO, prospective INSU-SIC)
- **Défis logistiques et techniques:** i) la mise en place d'une démarche qualité pour la fiabilité des mesures in situ en continu, ii) la bancarisation et diffusion des échantillons abiotiques et biotiques et des données numériques, iii) l'observation spatiale: continuité, implication des scientifiques en amont, nouveaux capteurs, changement d'échelle, iv) Traitement des grands jeux de données et développement algorithmiques (SNO, prospective INSU-SIC)

c) Revue de la littérature

De la revue de la littérature sur les transformations et les verrous actuels de l'hydrologie, nous retiendrons que :

L'hydrologie est passée d'une science de l'ingénieur à une science de la terre dans les 50 dernières années (Sivapalan, 2018). La première étape de cette transformation a été marquée par le passage d'une hydrologie opérationnelle basée sur des approches empiriques à la mise en œuvre d'une science Newtonienne (approche basée sur les processus abordés selon une mécanique Newtonienne). Ce concept d'une hydrologie basée sur les processus est dans une impasse (Sivapalan, 2018) à cause de l'hétérogénéité spatiale de moins en moins réductible avec l'augmentation des résolutions des représentations (Birkens et al., 2015) et à un manque de compréhension des interactions temporelles. En effet, les deux grands courants de la modélisation distribuée à base physique qui marque cette étape, i.e. la désagrégation de l'espace jusqu'à réduire l'hétérogénéité, ou bien l'adoption une échelle à laquelle la complexité peut être paramétrée simplement, donnent tous deux des résultats imparfaits (Sivapalan, 2018). La deuxième étape a donc été la prise en compte d'une « science de la terre » (zone critique), prenant en compte la coévolution des systèmes hydrologiques, des sols, du relief, de la végétation et de la géologie sous-jacente. Cette nouvelle approche implique de passer de la vision d'un bassin versant comme étant un système physique ou mécanique à un bassin versant vu comme un écosystème. De cette façon les processus hydrologiques seraient appréhendés comme les réponses à un fonctionnement de l'écosystème. Cette étape nécessite donc de passer à une représentation fonctionnelle (darwinienne) des socio-écosystèmes. Cette représentation fonctionnelle s'accompagne d'une attention accrue aux structures à différentes échelles d'espace et de temps, au travers de modèles numériques basés sur des données d'observation (en particulier spatiale ou issues de capteurs innovants). Cette approche est cependant limitée quand il s'agit de prédire et d'estimer la réponse des bassins là où elle n'est pas connue. Un changement de paradigme peut être nécessaire pour réconcilier les deux approches (physique et écosystème) toutes deux imparfaites. Il faut peut-être passer d'une science prédictive basée sur les estimations à une science qui cherche à comprendre les phénomènes nombreux en hydrologie, comme par exemple la relation en puissance entre le pic de crue et la taille des bassins. Cette compréhension pourrait passer par une approche comparative

(Darwinienne) du fonctionnement des bassins. Cette analyse des grandes étapes de l'évolution de la discipline « hydrologie » amène Sivapalan (2018) à proposer un « futur » pour la discipline. Ce futur consisterait à ne plus considérer les bassins versants comme des systèmes isolés les uns des autres, quelle que soit leur taille, mais à considérer une région entière comme un écosystème.

Le cadre général posé par cet article de revue présentant une vue globale et évolutive de la discipline hydrologie, n'empêche pas certains groupes de recherche de progresser sur les voies décrites comme des impasses par Sivapalan (2018). Ainsi Bierkens *et al.*, (2015) ont fondé un réseau de recherche nommé HyperHydro initiative. Revenant sur le problème posé par tous : quels processus doit on modéliser et quels processus est-il possible de paramétrer, ce réseau entend répondre aux nombreuses questions ouvertes demandant une résolution plus fine que celle aujourd'hui globalement disponible (1°), comme par exemple réconcilier les taux d'érosion avec le matériel en suspension transporté par les rivières, ce qui demande une description beaucoup plus fine que celle actuellement disponible du piégeage de sédiments, de l'érosion des berges et/ou du transport de fond. Une des raisons avancées par Bierkens *et al.*, (2015) pour augmenter les résolutions des modèles globaux est : « because we can ! ». En effet aussi bien l'augmentation incessante de la résolution des jeux de données disponibles, que la puissance de calcul ou le potentiel de la parallélisation vont dans ce sens. Bierkens *et al.*, (2015) pointent les principales difficultés dont la première est que certains processus qui peuvent être simplifiés à l'échelle de 1° ne peuvent plus l'être à des échelle plus fines. Par exemple, l'assertion que les flux de chaleur latente et de chaleur sensible sont proportionnels au gradient vertical de la température potentielle et de l'humidité spécifique n'est valide que si les gradients verticaux sont beaucoup plus importants que les gradients horizontaux. Pour des résolutions spatiales approchant les 100m et en dessous, les advections horizontales deviennent importantes et il faut développer de nouvelles théories pour modéliser correctement les échanges terre-atmosphère de la température et de l'humidité (Bierkens *et al.*, 2015). Le nombre d'exemples de ce type peut tendre vers l'infini, tant la complexité des processus et des interrelations entre les objets augmente avec la résolution. Sans compter le fait qu'augmenter la résolution d'un facteur 10 tend à augmenter les besoins en calcul et en stockage d'un facteur 100. Le but de ce réseau n'en demeure pas moins de travailler dans ce sens en inter comparant les modèles et en développant les concepts et les solutions qui permettrait de délivrer des jeux de données issues de modèles hyper résolues (<1km) globalement.

L'article un peu plus ancien de Troch *et al.*, (2009) revient sur le rôle de l'hétérogénéité de la zone critique dans l'incertitude des prédictions de la réponse des hydro-systèmes. Cet article explore de façon plus détaillée que la synthèse évolutive de Sivapalan (2015), l'impasse du raisonnement qui a été celui de l'hydrologie pendant de nombreuses années, i.e. que la compréhension des processus à fine échelle pouvait permettre d'extrapoler et de quantifier les processus à large échelle, pour autant qu'une valeur « équivalente » ou « effective » d'un paramètre variant linéairement avec l'échelle d'analyse (flux ou transport) pouvait être identifié. Au contraire, de nombreuses études montrent que le bassin versant joue le rôle d'un filtre non linéaire, qui augmente la disponibilité de l'eau en conditions d'étiage et augmente le ruissellement pendant la période de hautes eaux. Plusieurs arguments (théorie de la percolation, thermodynamique et principe d'optimalité) vont dans le sens de cette vision d'un bassin versant auto-organisé, qui évolue pour tendre vers un équilibre entre la diffusion dans le milieu poreux et le flux préférentiel dans des chenaux organisés de sub-surface, équilibre minimisant la résistance globale du milieu.

Peters-Lidard *et al.*, (2017) développe comme Sivapalan (2018) une vision évolutive de la discipline, en quatre étapes successives : le premier paradigme a été celui de l'empirisme, le second celui de la théorie, le troisième celui de la simulation numérique, et les auteurs pensent et argumentent qu'il est temps de passer au quatrième paradigme, celui d'une science des données massives, permettant

d'adresser les problèmes de transfert d'échelle et de similarité. Le transfert d'échelle est défini ici comme le transfert d'information au travers des échelles (échelle définie comme la distance ou le temps caractéristique d'un processus). Certains processus peuvent être invariants avec l'échelle. La similarité est définie comme le facteur d'échelle liant les caractéristiques de deux bassins versants. Il est nécessaire de changer de paradigme pour espérer résoudre ce problème très difficile, de nombreux auteurs ayant montré que des lois universelles en hydrologie ou les relations qui permettraient d'estimer les conditions aux limites du système (« closure problem ») nous échappent parce que la physique sous-jacente est probablement variable avec l'échelle considérée. La masse de données devenues disponibles, en particulier les données spatiales mais aussi les données de capteurs innovants, de données opportunistes ou issues de science participative, permet d'aborder le problème de la similarité par des analyses comparatives entre un grand nombre de bassins versants. Par exemple, les auteurs citent une étude de Coopersmith (2012) qui a démontré que 77% des bassins du site MOPEX pouvaient être décrits par seulement six classes combinant 4 signatures élémentaires (aridité, saisonnalité des précipitations, pic de précipitation, et pic de crue). Une vigilance est nécessaire pour ces recherches de similarité sur la cohérence d'échelle des données : en particulier sur les corrections de biais entre données (souvent spatiales) et modèle lors de l'assimilation (correction du biais sur les incertitudes est nécessaire et non pas seulement l'ajustement sur les données) ; nécessité également que les schémas de modélisation soient capables d'intégrer les données à leur résolution native ; une analyse approfondie des incertitudes et erreurs sur chaque jeu de données est aussi nécessaire, de même qu'il faut porter une attention spécifique à tous les choix arbitraires de la modélisation (pas de temps, résolution spatiale, schéma numérique, région étudiée, la période de calibration et validation, etc..).

Enfin, nous terminerons cette revue des articles de fond retenus par les membres du groupe de travail comme « textes de base » à analyser, par l'article de Montanari et al., (2013) qui a lancé la réflexion de la décade 2013-2022 de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (IAHS). Cette nouvelle décade s'intitule « Panta Rhei – Everything flows » et fait suite à la décade 2003-2012 intitulée « Prediction in Ungauged Basins – PUB ». Ces initiatives de l'IAHS, association internationale très active au niveau mondial et remarquablement en Afrique, sont des efforts de recherche collaborative sur la discipline qui sont très suivies. L'initiative PUB a suscité un très grand nombre d'articles et d'études dont quelques-uns ont marqué l'évolution de la discipline. La nouvelle décade Panta Rhei est née du constat que les analyses hydrologiques portant sur les connections entre systèmes ont été menées jusqu'à présent en considérant chaque système séparément, et que les modèles hydrologiques ont été conçus et paramétrés indépendamment de processus de coévolution potentiellement importants. En conséquence, ces modèles sont particulièrement adaptés à des bassins dans des conditions peu ou pas anthropisées, et les interactions avec la société ont été simulées par des couplages avec des modèles de comportement social développés indépendamment. Dans ce contexte, les rétroactions sont schématisées en introduisant quelques liens choisis entre variables d'entrée et de sortie comme conditions aux limites. Dans les conditions actuelles de l'accélération des impacts anthropiques, il devient essentiel de **considérer des systèmes couplés physiques-anthropiques et de ne pas séparer science hydrologique et gestion de la ressource en eau**. Les perspectives à considérer dans ce contexte pour cette décade qui s'achèvera en 2022 sont i) **l'explosion des données spatiales** qui donnent la possibilité d'observer plus directement les différentes variables constitutives du bilan d'eau. Le défi de cette décade sera certainement d'étudier l'évolution des hydrosystèmes. L'évolution spontanée des systèmes qui ne sont pas en équilibre thermodynamique (vivants) sont des **processus irréversibles**, et d'autre part, le changement est inconnu dans la mesure où sa force motrice, l'entropie, est étroitement liée à l'incertitude. **L'imprévisibilité est strictement liée à l'indétermination (équifinalité) et à l'incertitude**. Enfin l'une des questions de science fondamentale

pour le futur est celle des limites du système couplé hydrologique-sociétale : en d'autres termes, est ce que le bassin versant reste l'unité de base de l'étude hydrologique ?

5. Spécificités Sud et apport du Sud dans les Fronts de Sciences

Ce chapitre est un résumé des réponses du groupe de travail au questionnaire sur les deux aspects principaux que sont i) les spécificités du domaine intertropical et Méditerranéen dans le domaine des ressources en eau, et comme conséquence ii) l'apport à la discipline du travail de la planète IRD en partenariat avec les pays du Sud.

a) spécificités du domaine tropical et intertropical

- **Hydrologie de montagne**

La fonte des glaciers tropicaux est un marqueur du changement climatique et de sa distribution spatiale. La dynamique glaciaire et l'hydrologie nivale impactent fortement les régimes hydrologiques des bassins tropicaux.

- **Hydrologie urbaine**

L'urbanisation galopante des grandes métropoles du Sud entraîne des besoins spécifiques de développement en hydrologie urbaine, en lien étroit avec l'ODD6 et ses cibles sur la vulnérabilité de la ressource et sa préservation quantitative et qualitative.

- **Mesure des précipitations et études hydro-climatiques**

Le régime de mousson entraîne des événements pluviométriques spécifiques, ce qui a pour conséquence une variabilité spatiale et temporelle qui n'a pas d'équivalent en zone tempérée. Cette variabilité pose un défi spécial en termes de mesure et d'observation. La formation des nuages en zone tropicale et la dégradation des forêts sont interdépendants. D'autre part, la zone intertropicale est celle où les couplages surface continentale-atmosphère sont les plus forts au monde (avec les grandes plaines américaines), ce qui a pour conséquence de présenter le plus fort signal climatique du XXème siècle.

- **Zone critique**

Les zones de socles (craton Africain, bouclier Brésilien et plateau des Guyanes par exemple) ont une lithologie (altérites très épaisses, équilibre érosion chimique – érosion mécanique particulier) qui pose des questions scientifiques spécifiques pour l'hydrologie (couplage très fort entre les différentes couches, importance des flux de subsurface, recharge faible, méthode de prospection classique inadaptée).

- **Observations classiques**

La zone intertropicale et Méditerranéenne est l'endroit du monde où les caractérisations hydrodynamiques sont les moins denses et les moins fiables.

- **Pollutions**

Les eaux du Lac Titicaca ou du delta du Mékong ont des charges en contaminant caractéristiques des pays en développement et non observée dans les pays développés. En particulier les recherches sur les micro-plastiques sont issues d'études sur les chantiers sud.

- **Energie**

Les besoins en énergie sont particulièrement importants en Afrique, et l'indépendance énergétique est une problématique essentielle des milieux insulaires.

b) Apport du Sud dans les fronts de science

- **Intégration physique-anthropique, science-gestion**

Les changements anthropiques très rapides ont favorisé le développement d'outil d'aide à la gestion intégrée des ressources en eau, ou d'aide à la planification des irrigations. Le risque inondation – notamment en contexte urbain – est à la fois un enjeu de recherche et un enjeu opérationnel pour les pays du Sud. Ces enjeux favorisent les approches intégrées et l'interdisciplinarité.

- **Processus associés aux zones arides**

Les processus spécifiques des zones arides (endoréisme; fragmentation des objets hydrologiques) et l'enjeu des services écosystémiques apportés par les mares et les retenues en zone aride ont fait émerger de nouvelles questions de sciences, liées aux défis de l'observation et de la modélisation de ces hydrosystèmes (régimes intermittents), et à leur sensibilité aux variations et évolutions du climat.

- **Grands bassins tropicaux et bassins transfrontaliers**

Le développement et l'utilisation massive en hydrologie de nouveaux systèmes d'observation (observations spatiales; méthodes opportunistes; capteurs connectés; observations citoyennes) est catalysé par le déficit d'observation hydro-météo conventionnelles dans les pays du sud (même émergents), en particulier dans les grands bassins tropicaux et les bassins transfrontaliers. Les processus associés aux forêts humides (voir plus haut) et aux grandes plaines d'inondation ont apporté des avancées dans les couplages surface-atmosphère, interactions biogéochimiques, échanges nappes-surface.

- **Thématique eau-santé**

La thématique eau-santé, aussi bien sur les maladies à vecteurs (paludisme, dengue, chikungunha, billarsiose, entre autres) que sur les maladies liées à la pollution et aux contaminations, est née des enjeux de la zone intertropicale et Méditerranéenne.

- **Domaine littoral et insulaire, deltas**

Ce domaine, bien que non spécifique, est particulièrement lié aux enjeux du Sud (submersion marine, érosion des côtes et salinisation).

6. Collaborations, partenariat national et international

L'analyse des co-publications de l'IRD en hydrologie dans le corpus de textes du WoS donne le résultat présenté figure 5 et 6.

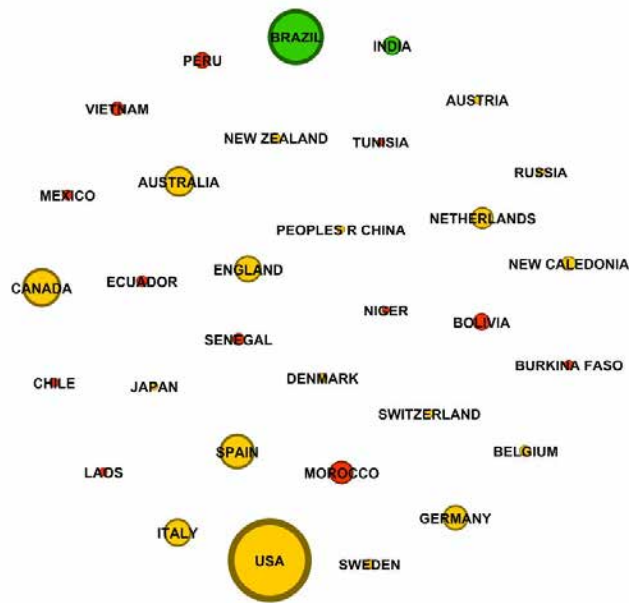


Figure 15 : Les pays co-publiant du corpus de textes (WoS) en hydrologie ayant IRD dans les mots clés « organisation_enhanced » ; en vert les pays émergents, en rouge les pays en développement. Algorithme de spatialisation Fruchterman Reingold, Gephi 0.9.2. La taille des cercles est proportionnelle au nombre de co-publications.

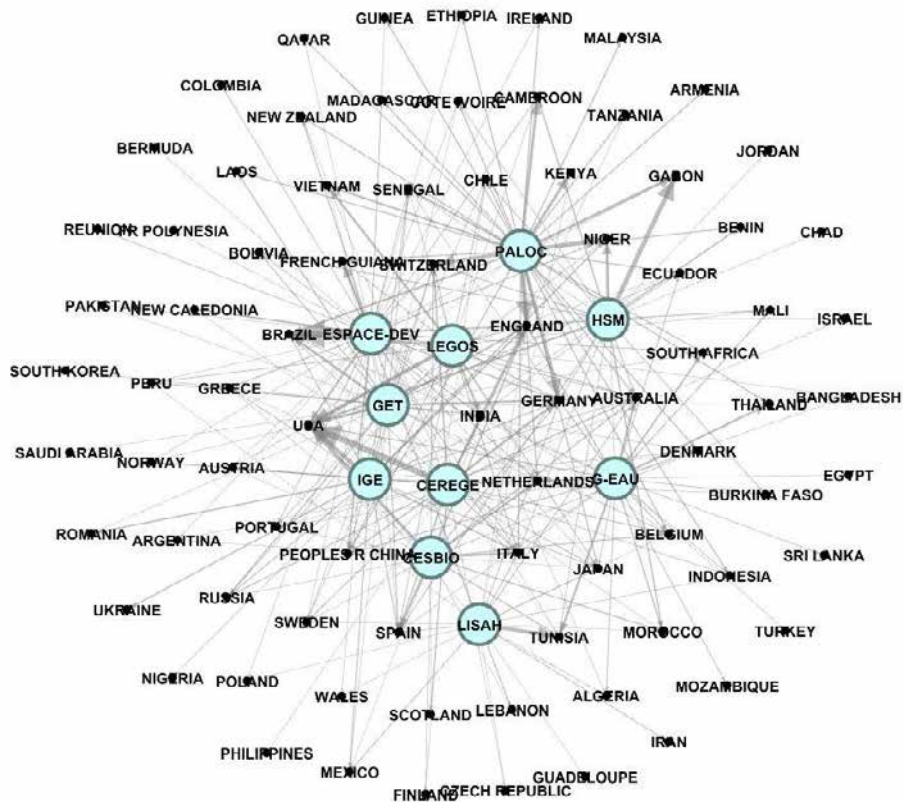


Figure 16 : Analyse spatiale des co-publications des UMRs de l'IRD (Corpus WoS). Algorithme de spatialisation Fruchterman Reingold, Gephi 0.9.2. La taille des flèches correspond au nombre de co-publications pour chacune des UMRs

Conclusion

La discipline a connu à l'IRD une évolution très marquée d'une science de l'ingénieur à une science de la surface du système terre ou de la zone critique, qui a accompagné, peut-être dans ses tous premiers mouvements, une évolution globale de la discipline.

La discipline a des spécificités marquées dans la zone méditerranéenne et tropicale et le fait de travailler sur cette zone amène des évolutions notables des verrous scientifiques sur lesquels travaille la planète IRD ; Les spécificités sont en particulier le rôle des glaciers tropicaux comme marqueur du changement climatique, l'urbanisation galopante, le régime de mousson, le très fort couplage entre l'atmosphère et la surface, l'épaisseur de la zone critique due à un équilibre altération chimique/érosion spécifique, l'importance des flux de sub-surface, la faiblesse de la recharge des nappes, les charges en contaminants très importantes dans certains lacs et rivières, les besoins d'indépendance énergétique, la faiblesse des infrastructures d'observations ; ce sont autant de spécificités qui ont amené l'IRD à être moteur dans de nombreuses innovations scientifiques et méthodologiques.

Les verrous scientifiques pris en compte par la planète IRD représentent les champs essentiels considérés au niveau mondial : l'objet zone critique vient accompagner l'objet hydro-système et donc souligne bien le passage de l'investissement scientifique depuis a) le transfert de l'eau dans les objets hydrologiques que sont les rivières et les réservoirs de surface à b) la complexité de l'objet zone critique. Que la méthodologie la plus partagée soit l'assimilation de données spatiales et de capteurs innovants, associée à la modélisation, renvoie bien au manque de données traditionnelles en zone intertropicale et méditerranéenne et à la place essentielle que l'IRD et ses partenaires ont pris dans ce domaine. De la même façon, l'hydrologie en zone aride et son déficit systématique de précipitations par rapport à l'évaporation, la répartition des ressources en zone agricole et anthropisée, l'hydrologie urbaine, et l'interface océan/continent sont autant de thématiques dans lesquelles la planète IRD a une place de premier plan au plan national et international, et les avancées sur ces thèmes sont directement en lien avec les enjeux auxquels les chercheurs sont confrontés plus que d'autres dans d'autres régions du globe.

D'autres fronts de science actuels qui sont ouverts aujourd'hui sont a) l'intégration des compartiments biotiques-abiotiques, et b) l'intégration explicite de la co-évolution du socio-écosystème. Ces deux verrous renvoient au besoin impératif de plateformes intégrées de modélisation pour traiter ces questions.

En conclusion, l'IRD a une place non négligeable compte tenu de la taille de son effectif strict dans la production scientifique française dans la discipline et un rôle important dans l'évolution de la discipline, tiré par les innovations nécessaires pour répondre aux enjeux spécifiques du Sud. La distribution géographique des chantiers, instruments et observatoires au Sud répond à la logique des champs d'application de la discipline.

Annexe 1 : Membres du groupe de travail

1. CEREGE : Pierre Deschamps (IRD), Christine Vallet Coulomb (AMU), Thomas Stieglitz (IRD)
2. CESBIO : Lionel Jarlan (IRD)
3. ESPACE-DEV : Marie Paule Bonnet (IRD – Prospective INSU)
4. G-EAU : Pierre Olivier Malaterre (IRSTEA)
5. GET : Marielle Gosset (IRD), David Labat (UPS)
6. HSM: Jerome de Marty (IRD)
7. IGE: Jean Martial Cohard (UGA), Guillaume Favreau (IRD, membre du CS IRD)
8. LEGOS: Jean François Creteau (CNES), Fabrice Papa (IRD), Frederic Frappart (CNAP)
9. LISAH: Frederic Jacob IRD, Jean Albergel (IRD, membre panel CICID)
10. PALOC : Luc Descroix (IRD)
11. IMPMC : Farid Julliot (IRD)

Annexe 2 : Liste des textes utilisés

1. Evolution de la discipline à l'IRD :

- Les disciplines scientifiques à l'IRD. Etat des lieux, caractérisation, évolution. Rapport de la Direction Générale Délégée à la Science, IRD, 31 Juillet 2013.
- L'Hydrologie de Surface à l'Orstom-IRD : une science de l'ingénieur devenue science de l'environnement. Jacques Claude, Contribution au projet ENGOV, 2012.

2. Contexte

- Réponse des organismes de recherche au questionnaire du CICID pour l'élaboration de la stratégie de la France à l'international pour l'eau et l'assainissement, rapport, 2018.
- Winter, J. M., Lopez, J. R., Ruane, A. C., Young, C. A., Scanlon, B. R., & Rosenzweig, C. (2017). Representing water scarcity in future agricultural assessments. *Anthropocene*, 18, 15–26. <http://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.05.002>
- Nations Unies. (2018). Les Solutions Fondées Sur La Nature Pour La Gestion De L' Eau.
- Nations Unies. (2018). Les Solutions Fondées Sur La Nature Pour La Gestion De L' Eau.
- Zambrano, L., Pacheco-Muñoz, R., & Fernández, T. (2017). A spatial model for evaluating the vulnerability of water management in Mexico City, Sao Paulo and Buenos Aires considering climate change. *Anthropocene*, 17, 1–12. <http://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.12.001>
- Potable, E. A. U., Eau, D., & Assainissement, E. T. (n.d.). Eau Potable Sde.
- Kezdi, P., & Wennemark, J. (1958). Ebstein's malformation*. Clinical findings and hemodynamic alterations. *The American Journal of Cardiology* (Vol. 2). [http://doi.org/10.1016/0002-9149\(58\)90231-5](http://doi.org/10.1016/0002-9149(58)90231-5)
- CICID. (2014). L'action extérieure de la France pour l'eau et l'assainissement.
- Rockström, J., & Falkenmark, M. (2015). Agriculture: Increase water harvesting in Africa. *Nature*, 519(7543), 283–285. <http://doi.org/10.1038/519283a>
- Keys, P. W., & Falkenmark, M. (2018). Green water and African sustainability. *Food Security*, 10(3), 537–548. <http://doi.org/10.1007/s12571-018-0790-7>
- pS-Eau. (2017). Les Objectifs de Développement Durable pour les services d'eau et d'assainissement - Décryptage des cibles et indicateurs. Retrieved from <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/ODD>
- Mugagga, F., & Nabaasa, B. B. (2016). The centrality of water resources to the realization of Sustainable Development Goals (SDG). A review of potentials and constraints on the African continent. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), 215–223. <http://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.05.004>

3. Perspectives

- New Opportunities for Critical Zone Science (2017). Sullivan, P.L., Wymore, A.S., McDowell, W.H. et al. 2017 CZO Arlington Meeting White Booklet
- Prospective INSU Surfaces et Interfaces Continentales, chapitre « Approche Intégrée ». Draft (Prospective non encore publiée)
- Prospective INEE, Compte Rendu des journées des 22, 23 et 24 Février 2017, Bordeaux, hors série.

4. Actualités de la discipline

- Bierkens, M. F. P., Bell, V. A., Burek, P., Chaney, N., Condon, L. E., David, C. H., ... Wood, E. F. (2015). Hyper-resolution global hydrological modelling: What is next?: "Everywhere and locally

relevant” M. F. P. Bierkens et al. Invited Commentary. *Hydrological Processes*, 29(2), 310–320. <http://doi.org/10.1002/hyp.10391>

- Sivapalan, M. (2018). From engineering hydrology to Earth system science: Milestones in the transformation of hydrologic science. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(3), 1665–1693. <http://doi.org/10.5194/hess-22-1665-2018>
- Montanari, A., Young, G., Savenije, H. H. G., Hughes, D., Wagener, T., Ren, L. L., ... Belyaev, V. (2013). “Panta Rhei-Everything Flows”: Change in hydrology and society-The IAHS Scientific Decade 2013-2022. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1256–1275. <http://doi.org/10.1080/02626667.2013.809088>
- Peters-Lidard, C. D., Clark, M., Samaniego, L., Verhoest, N. E. C., Van Emmerik, T., Uijlenhoet, R., ... Woods, R. (2017). Scaling, similarity, and the fourth paradigm for hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3701–3713. <http://doi.org/10.5194/hess-21-3701-2017>
- Troch, P. A., Carrillo, G. A., Heimbüchel, I., Rajagopal, S., Switanek, M., Volkmann, T. H. M., & Yaeger, M. (2009). Dealing with landscape heterogeneity in watershed hydrology: A review of recent progress toward new hydrological theory. *Geography Compass*, 3(1), 375–392. <http://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00186.x>

Annexe 3 : Requêtes exécutées pour les analyses du WoS

1. Place de la discipline à l'IRD au plan national et international

a) Showing 201,118 records for TS = (water* OR hydrology OR river* OR lake* OR moisture OR evapotranspiration OR catchment OR flow* OR discharge OR stream* OR watershed OR drought OR flood* OR inundation OR snow OR delta OR glacier OR rainfall OR fluvial OR storm* OR irrigated OR groundwater OR resources OR delta* OR basin* OR karst)

b) Sélection des disciplines WoS suivantes:

Web of Science Categories	records	% of 201118
ENVIRONMENTAL SCIENCES	134187	66.721
WATER RESOURCES	65776	32.705
LIMNOLOGY	20791	10.338
GEOGRAPHY	14407	7.163
REMOTE SENSING	8496	4.224
GEOGRAPHY PHYSICAL	4789	2.381
URBAN STUDIES	283	0.141

(0 Web of Science Categories {0} {1} value(s) outside display options.)
(0 records (0.000%) {0} records {1} do not contain data in the field being analyzed.)

c) Place de l'IRD

A l'intérieur de ce corpus, ont été sélectionnés tout d'abord les travaux français (sélection country = France), donnant un corpus de 8552 articles, puis à l'intérieur de cet ensemble ont été sélectionnés les 1173 publications ayant « IRD » dans le champ « Organisation Enhanced ».

d) Analyse des pays des co-publications

Une première analyse des co-publications a été effectuée à partir de ce corpus, en analysant le champ « countries » du corpus.

2. Corpus de la discipline pour les différentes UMR

Pour chacune des UMRs, la requête suivante a été effectuée :

OG = (« Sigle UMR » OR « nom complet UMR ») OR OO = (« Sigle UMR » OR « nom complet UMR ») OR SG = (« Sigle UMR » OR « nom complet UMR »)

Les entrées ont été ensuite sélectionnées sur la discipline « WATER RESOURCES » uniquement.

Les pays de co-publication ainsi que les collaborations de chacune des UMRs ont été analysés à partir du champ « countries » pour chacun des corpus sélectionnés par UMR.

Annexe 4 : Structures et effectifs

HSM		Sud		GET	Sud	IGE		Sud		CEREGE	CESBIO		G_EAU		LEGOS	PALOC		LISAH	ESPACE-DEY		
Equipe ContEm	Contaminants Emergents	Aghien (Projet Lagune Aghien)		Equipe 1 "Géoresources"	Chantiers au Sud: Andes-Amazonie; Afrique de l'Ouest	CHIANTI	Chimie Atmosphérique, Neige, Transferts et Impacts	Chantier Sud IGE "Bolivié-Vulnérabilités Environnementales"	CHARIME (Climate High Altitude Tropical Atmosphere)	CLAP (SNO "CLAP" Station de Chacaltaya -Bolivié)	Climat	Equipe Modélisation	Equipe d'animation scientifique: Modélisation du fonctionnement et	Adaptations	Dynamiques croisées « eaux et sociétés »: adaptations A partir de la compréhension des interdépendances entre eau et société, cette équipe analyse les conséquences des changements et perturbations auxquels les territoires hydrologiques Controverses et Action Publique Les savoirs et les pratiques liés aux ressources en eau, de même que les modes de gouvernance et de régulation des usages, connaissance des recompositions importantes qu'il s'agit de comprendre et de mettre en Gestion Hydraulique, Optimisation et Supervision des Transferts d'Eau. L'équipe (10 chercheurs et ingénieurs) mène des recherches sur la gestion des systèmes hydrauliques à surface libre tels que les canaux d'irrigation, les rivières, fleuves et réseaux.	ELIUS - Etude de la cryosphère et de l'hydrologie antarctique	Axe 1: Emergences, appropriations et usages des patrimoines	MANDU (ANR CE03 - Interaction Homme-Environnement - COMANCO (Déposé - Un-bénéfices de la conservation de la	TAPIOCA (ANR CE01 - Milieu et biodiversité: Terre fluide et	Eau et polluants en bassins versants cultivés	AIMS Approches intégrées Milieu-Sociétés MILAU Modélisation Ingénierie des connaissances
Equipe ECHANGES	Eau, Changements Environnementaux et Sociétaux	ECHANGES (Scénarios prospectifs complexes et ressources en eau)		Equipe 2 "Terre Interne Lithosphère"	Chantiers au Sud: Andes; Afrique de l'Ouest	CYME	Cryosphère et hydrologie de Montagne	Chantier Sud IGE "Glaciers au sud"	GlacioClim / Cryohydroclim (SNO GlacioClim SOERE Cryohydroclim	GREATICE (Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes	Environnement durable	Equipe Systèmes d'observation	Equipe d'animation scientifique: Développement de stratégies d'observation	CAP	ECOLA - Echanges côtière/large	Axe 2: Sociétés globalisées et environnement			Erosion et transports solides en bassins versants cultivés	Observation spatiale de l'environnement	
Equipe ETH	Etude multi-échelle des Transferts en Milieux Hétérogènes	ressources en eau dans les périodes de Nouvelle Calédonie		Equipe 3 "Géophysique et Géodésie Spatiale"	Chantiers au Sud: Andes; Réunion	GLACE	Cryosphère et terrestre dans les régions polaires				Ressources, Réservoirs, Hydrosystèmes			GHOSTE	OLVAC - Océan du large et variabilité climatique	Axe 3: Savoirs, collections et circulations			Structures spatiales et dynamiques des sols et des paysages	Observation spatiale de l'environnement	
Equipe EvExt	Evénements Extrêmes	modélisation de nouveaux modes de gestion des ressources en eau dans les milieux ruraux à	Rain-Cell Africa	Equipe 4 "L'ouplages Lithosphère-Océan-Atmosphère"	Chantiers au Sud: Andes; Afrique de l'Ouest	HMCIS	HydroMétéorologie, Climat et Interaction avec la Société	Chantier Sud IGE "Afrique de l'Ouest"	OHMCY (SNO OHMCY)		Terre, Planètes			INCA	SYSON2 - SYSTèmes COmpléxes COuplés						
Equipe Karst	Karst & Aquifères hétérogènes - hydrogéologie & Transferts	Ressources en eau dans les périodes de Nouvelle Calédonie		Equipe 5 "Hydro-biogéochimie de la zone critique"	Chantiers au Sud: Andes-Amazonie; Afrique de l'Ouest; Centrale; Asie du Sud Est;	CE3	Carottes, Climat, Chimie	Ice Memory (Ice memory)						IPD - Ingénierie de la participation et de la Décision	TIM - Toulouse Isotopie Marine						
Equipe PHYSE	Pathogènes Hydriques, Santé, Environnement	Aghien (Projet Lagune Aghien)		Equipe 6 "Interfaces"	Chantiers au Sud: Andes-Amazonie	MEOM	Modélisation Ensemblée de l'Océan à Multi-échelles Processus							OGEA							
Equipe PoMES	Pollutions Minières, Environnement et Santé	Aghien (Projet Lagune Aghien)		Equipe 7 "(Bio)Géochimie expérimentale et modélisation"		PhyREV	Hydrologiques et Ressources en eau Vulnérable	AMMA Catch (SNO AMMA Catch)	chantier Sud IGE "Afrique de l'Ouest"					OPTIMISTE							
Equipe PUrh	Pollutions Urbaines et Hydrologie	Aghien (Projet Lagune Aghien)		Equipe 8 "Géochimie des Isotopes Stables"	Chantiers au Sud: Andes-Amazonie; Nouvelle Calédonie									PHS - Pratiques, représentations sociales liées à l'eau et changements							
Equipe TECHS	Transferts dans les Eco-Hydrosystèmes	Aghien (Projet Lagune Aghien)	AGRAF	Equipe 9 "Géomatériau"										Socio-Hydro							

Tableaux des structures pour les 10 UMRs concernées ; en bleu les équipes représentant la discipline « hydrologie » pour chacune des UM

