

# La contribution de l'ORSTOM-IRD à l'hydrologie des régions de basse latitude (1943-2024)

Solutions opérationnelles, analyses des processus,  
hydroclimatologie régionale  
et observatoires à long-terme

Pierre Chevallier, Gil Mahé, Christophe Bouvier,  
Jean-Emmanuel Paturel et Nathalie Rouché

*Laboratoire HydroSciences, Montpellier, France  
(Université de Montpellier, CNRS, IRD, IMT Mines Alès)  
Auteur correspondant : pierre.chevallier@ird.fr*

Ce document est une traduction en français de l'article :

Chevallier, P., Mahé, G., Bouvier, C., Paturel, J.-E., Rouché, N., 2025. The ORSTOM-IRD Contribution to the Hydrology of Low-Latitude Regions (1943–2024): Operational Issues, Process Studies, Regional Hydroclimatology and Long-Term Monitoring. *Earth Sciences History* 44(2) 614-643. DOI: 10.17704/1944-6187-44.2.614

Les sous-titres dans les sections sont des ajouts pour la version française.

## Résumé

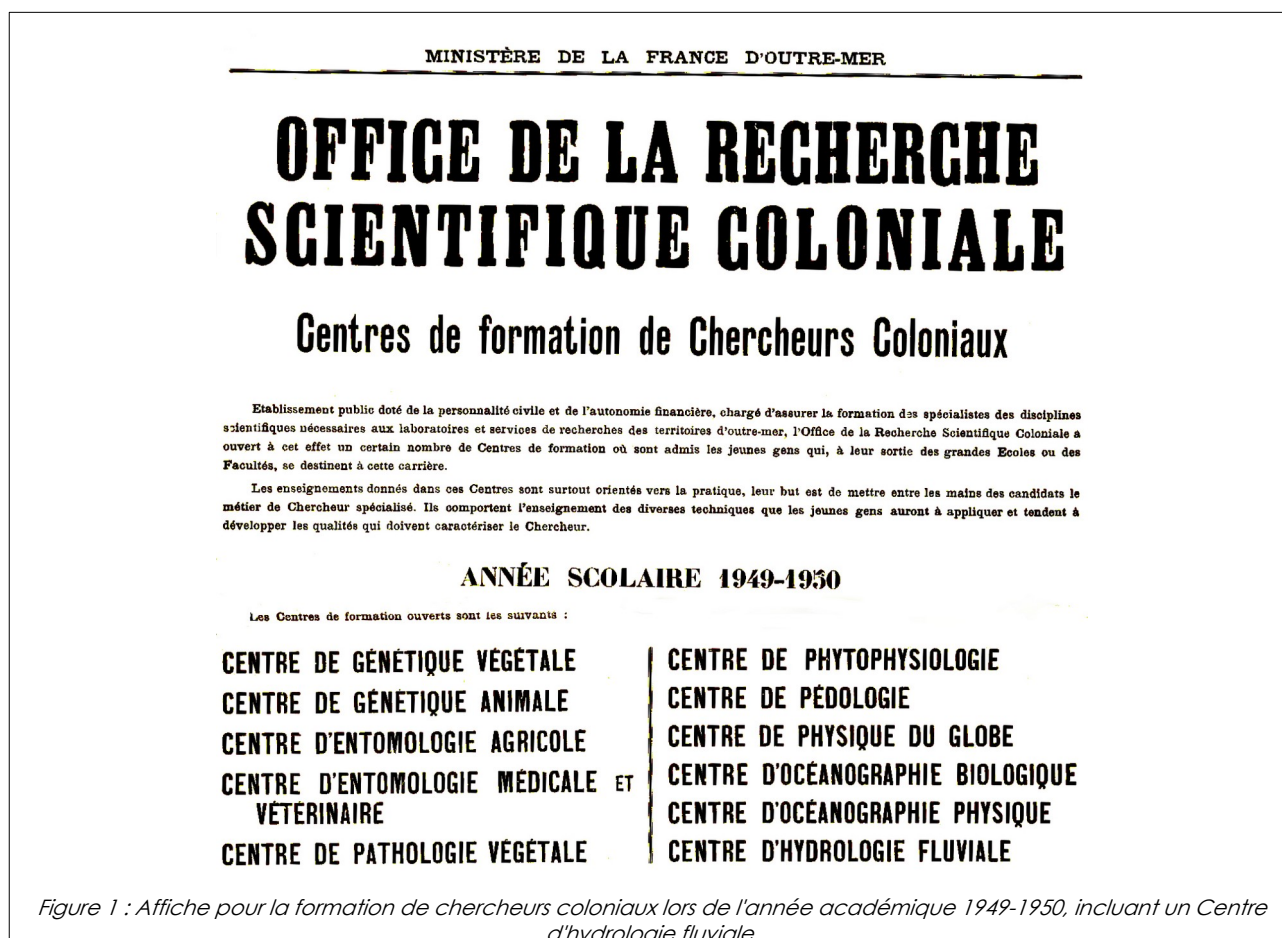
L'ORSTOM-IRD, un établissement français de recherche, a contribué depuis 80 ans à l'observation des composantes du cycle de l'eau dans plusieurs régions sous les basses latitudes. A l'origine dévolus à l'observation des grands bassins fluviaux d'Afrique, les hydrologues de l'ORSTOM-IRD ont commencé à instrumenter des petits bassins dès les années 1950 pour répondre aux besoins techniques de développement d'infrastructures et pour mieux comprendre les processus contrôlant le cycle local de l'eau dans des environnements variés. À partir du début des années 1990, ils se sont sérieusement impliqués dans des *Projets Hydroclimatiques Régionaux* (PHR) ; ce sont des grands programmes internationaux qui cherchent à identifier les interactions entre les surfaces continentales et l'atmosphère dans les environnements tropicaux. Les PHR ont généré des programmes d'observation à long-terme qui constituent aujourd'hui des outils essentiels pour le suivi du cycle hydrologique dans des régions où un accès sécurisé à l'eau n'est toujours pas garanti et où il est menacé par les impacts du changement global.

**Mots-clés :** basse latitude, processus hydrométéorologiques, ingénierie hydrologique, mesures et bases de données, formation.

## 1. Introduction

Les régions intertropicales de basse latitude reçoivent la moitié du cumul total d'énergie solaire sur Terre et, pour cette raison, sont le siège des plus importants volumes d'échange du cycle continental de l'eau, avec des conséquences majeures sur le climat global. Les études scientifiques sur les ressources en eau dans les anciens territoires coloniaux de ces régions ont débuté dans les dernières décennies du 19<sup>e</sup> Siècle, en particulier dans l'Empire Britannique. En Afrique le suivi systématique des principaux fleuves (Nil, Sénégal, Niger, Congo) a débuté à la fin du 19<sup>e</sup> Siècle et au début du 20<sup>e</sup>. C'était une tâche des puissances coloniales qui s'intéressaient surtout aux routes fluviales et aux potentiels agricoles.

Dans les colonies françaises, un établissement généraliste scientifique, initialement nommé *Office de la Recherche Scientifique Coloniale* (Figure 1), dédié aux colonies, a été créé en 1943, et complètement installé en 1946 après la victoire des Alliés lors de la Seconde Guerre Mondiale (Gleizes 1985 ; Bonneuil 1991). Le mot *colonies* a été remplacé par *territoires d'outre-mer* en 1949. La mission de l'*Office* a évolué plus tard vers une assistance aux jeunes pays indépendants et plus récemment vers une contribution à l'agenda international pour un développement durable des régions sous les basses latitudes. Le nom de l'*Office* a changé plusieurs fois ; les plus utilisés et connus ont été ORSTOM (*Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer* de 1953 à 1998) et IRD (*Institut de Recherche pour le Développement* depuis 1999).



Un *Centre d'Hydrologie Fluviale* a été créé en 1946 (Figure 1). Il a rapidement élargi son champ d'action pour devenir l'une des plus importantes sections de l'ORSTOM en formant des hydrologues spécialistes des environnements tropicaux, non seulement en France, mais aussi dans les pays et territoires où il intervenait : Afrique de l'Ouest, du Nord et Centrale, Madagascar, départements et territoires français d'outre-mer et Amérique du Sud. Très tôt une convention avec la division outre-mer d'*Électricité de France* a permis de partager des compétences et des ressources dans le but de traiter des problèmes d'ingénierie : contrôle des crues, calcul d'infrastructures et alimentation en eau (Dubreuil 2003).

Du début des années 1950 jusqu'au milieu des années 1980, la plupart des actions étaient engagées pour résoudre des problèmes techniques ou opérationnels, souvent avec les agences nationales et internationales, mais aussi sous la forme de prestations pour des entités tierces. Le milieu des années 1980 a constitué un virage à double titre, *l'hydrologie comme une géoscience*, et l'ORSTOM comme un établissement de recherche (Chevallier et Pouyaud, 1995). Eagleson écrivait :

Les hydrologues doivent désormais considérer l'atmosphère et les surfaces continentales comme un système interactif couplé, une perspective qui nous rapproche du point de vue des géophysiciens d'un fonctionnement à une échelle globale. (Eagleson 1986, p.6S)

En 1985, l'ORSTOM devient un établissement public de recherche dont le mandat principal est de développer une recherche académique centrée sur les régions tropicales dans les domaines de la santé, de l'environnement et des sciences économiques et sociales. Un *Département des Eaux Continentales* est créé en 1987. Lorsque l'ORSTOM devient IRD en 1999, des *unités mixtes de recherches* sont mises en places avec les universités (Grenoble, Montpellier, Toulouse et Paris), des établissements nationaux de recherche comme le CNRS, l'INRAE, le CNES, Météo-France et quelques autres, dans le but de promouvoir une recherche interdisciplinaire impliquant des hydrologues, des modélisateurs du climat, des micrométéorologues, des pédologues, des agronomes, des chimistes de l'environnement et des spécialistes de la télédétection satellitaire. Parallèlement en aidant au renforcement des capacités locales de recherche dans les pays où l'ORSTOM était actif, la recherche interdisciplinaire restait une mission centrale de l'établissement.

A l'aube du 21<sup>e</sup> Siècle l'Académie des Sciences écrivait :

La recherche à destination des pays du Sud, qui relevait surtout d'une obligation de solidarité, d'aide au développement et de transfert scientifique et technologique, est devenue partie prenante de la plupart des recherches concernant les biens publics mondiaux. (Académie des Sciences, 2006, p. xxviii)

Cela dit, il reste que l'accès sûr à l'eau, la sécurité alimentaire, la santé globale et la réduction de la pauvreté sont toujours des défis clés dans de nombreux pays tropicaux, mis en exergue par la publication des *Objectifs de Développement Durable* (ODD, SDG en anglais) de l'Assemblée Générale des Nations Unies en 2015, en faisant appel à l'engagement d'une vaste communauté scientifique, à laquelle les hydrologues de l'ORSTOM-IRD apportent une expérience originale, unique et ancienne.

L'objet de cet article est de documenter comment l'hydrologie ORSTOM-IRD a évolué au long de ses 80 années, d'un service colonial à un contributeur scientifique aux plus récents développements de la discipline, en restant concentré sur les milieux de basse latitude et sur les piliers du développement global, humain et environnemental, dans des programmes d'observation de terrain, sans oublier quelques résultats scientifiques clés issus de ces activités. Bien-sûr, cela ne rend pas totalement compte de toutes les activités conduites par l'ORSTOM-IRD au cours de huit décennies, mais nous avons estimé que les observations étant le premier pas de toute science naturelle, c'était un bon fil conducteur pour contribuer à l'histoire de l'hydrologie, particulièrement dans les régions intertropicales.

Après l'exposé d'un résumé historique général du développement des activités hydrologiques de l'ORSTOM-IRD dans la section 2, les sections suivantes examinent plus en détail deux larges domaines d'activités de recherche : celles principalement concernées par les études de processus dans la section 3, alors que la section 4 traite des *programmes hydroclimatiques régionaux* (PHR), sachant qu'il y a souvent des intersections entre les deux. Enfin la section 5 est consacrée à la présentation des activités techniques, essentielles pour les recherches en aval.

Les références fournies dans le texte ne sont qu'indicatives ; elles ont été choisies dans un très large corpus de productions scientifiques comptant plusieurs milliers d'articles et de livres publiés par les chercheurs de l'ORSTOM-IRD. Une telle sélection ne prétend pas être exhaustive, mais elle ambitionne d'aider le lecteur dans sa quête bibliographique, en fonction de ses principaux centres d'intérêt.

## **2. Documenter les régimes hydrologiques et leurs processus dans les basses latitudes**

L'implication de l'ORSTOM-IRD dans les observations hydrologiques en Afrique tropicale prend racine dans l'histoire coloniale de la France, la découverte par les explorateurs européens ayant été perçue par certains historiens comme la *mère* de la colonisation (Bonneuil 1991). L'attraction pour la *terra incognita* d'Afrique tropicale avec ses ressources et la densité relativement faible de sa population a alimenté la double motivation pour l'exploration et la colonisation. En conséquence, et jusqu'au début des années 1900, la plupart de l'information

scientifique collectée dans les régions tropicales venait d'explorateurs civils (naturalistes, géographes), militaires ou missionnaires, opérant individuellement ou avec le soutien institutionnel de sociétés savantes, de l'armée ou d'églises. Ce type d'exploration n'était pas propice à des mesures consistantes sur le long terme des conditions météorologiques et hydrologiques, et ne pouvait pas non plus être confié aux populations locales.

Après la Première Guerre Mondiale, le développement de ces régions est devenu un enjeu majeur pour les puissances coloniales en Afrique. Le terme *développement* n'avait pas le même sens qu'aujourd'hui ; à cette époque il se référait clairement à la maximisation des capacités d'extraction des ressources naturelles, avec peu de considérations pour les bénéfices que les populations locales pouvaient en retirer (Hours 2020). Les services météorologiques ont été créés avec la mission d'acquérir les connaissances les plus utiles pour les activités agricoles. En Afrique de l'Ouest et Centrale, cela a conduit au développement de réseaux qui comptaient plusieurs centaines de stations météorologiques en 1945. A la même époque, les mesures hydrologiques restaient largement insuffisantes, avec seulement une quarantaine de stations hydrométriques jaugées dans les bassins du Niger et du Sénégal et un nombre équivalent dans le bassin du Congo (Olivry et Sircoulon 1998). Les lectures de niveaux d'eau étaient réalisées le plus souvent sur une base hebdomadaire, avec très peu de jaugeages réalisés pour calibrer ces stations. Par conséquent on n'avait que très peu de connaissance sur les régimes hydrologiques de ces grands fleuves. Dans les contextes politiques très différents d'Amérique du Sud et d'Asie du Sud-Est, la nécessité d'une meilleure connaissance des ressources en eau et des risques associés avait été reconnue, conduisant à l'émergence progressive d'une spécialité d'*hydrologie tropicale*.

### **Origine : une vocation opérationnelle.**

Après la Seconde Guerre Mondiale, la construction d'infrastructures a été stimulée par l'accélération de l'exploitation minière, agricole et forestière, le développement de l'urbanisation et la construction de routes. De nombreux ponts routiers et petits ouvrages hydrauliques agricoles s'effondrèrent, illustrant les conséquences désastreuses de construire des infrastructures sans les connaissances hydrologiques appropriées et les mesures adéquates (Dubreuil 2003). Le *Bureau Central Hydrologique* de l'ORSTOM a alors été créé au bon moment pour prendre en charge à la fois un programme d'observations à long-terme sur les grands cours d'eau et pour mettre en place des programmes de mesures à plus court-terme sur une large gamme de bassins versants. En 1955, l'ORSTOM a pris l'initiative de mettre en place et d'organiser une série d'études hydrologiques sur des petits bassins versants (de surface inférieure à 1000 km<sup>2</sup>), appelés *Bassins Versants Représentatifs et Expérimentaux* (BVRE) – voir section 3 ci-dessous pour plus de détails.

Au moment de l'indépendance des colonies africaines au début des années 1960, l'ORSTOM est devenu le principal, sinon le seul, opérateur hydrologique dans les anciennes colonies françaises d'Afrique. Des services hydrologiques nationaux ont été créés dans chaque nouvel état indépendant, chargés des réseaux opérationnels. L'ORSTOM a continué d'apporter un fort soutien à ces nouveaux services hydrologiques nationaux, principalement sous le couvert du *Comité Interafricain d'Études Hydrauliques* (CIEH), qui a coordonné des opérations similaires dans 14 états francophones de l'Afrique subsaharienne. L'ORSTOM participait à la formation d'ingénieurs et de techniciens ; il aidait à la collecte des données et à la constitution d'annuaires annuels de données ainsi qu'à la publication de *monographies* pour tous les grands bassins d'Afrique de l'Ouest et Centrale (voir section 4, ci-dessous). L'ORSTOM développait aussi des moyens instrumentaux pour numériser les observations dès les premiers enregistrements des stations de jaugeages et pour les organiser en bases de données (voir section 5, ci-dessous).

Après les indépendances, le rôle opérationnel de l'ORSTOM a commencé à décroître jusqu'à s'éteindre dans les années 1980, mais certaines actions ont continué jusqu'à la fin des années 1990, en particulier au Mali où une équipe d'hydrologues de l'ORSTOM a continué d'assurer la gestion du réseau principal de stations de jaugeage sur le fleuve Niger pratiquement jusqu'en 2000 (Marieu *et al.* 1998). De même le programme des BVRE a continué quelque temps, mais il s'est rapidement orienté vers l'acquisition d'une meilleure compréhension des processus

hydrométéorologiques dans des environnements tropicaux variés (arides, semi-arides, de savane humide, forestiers, urbains et même de hautes montagnes), comme cela est développé dans les sections suivantes (voir aussi Dubreuil 1985, pour une revue de l'héritage scientifique de ces champs d'opération dans les années postérieures aux indépendances). Le programme s'est achevé avec la publication d'un livre de référence (Nouvelot 1993).

L'indépendance des anciens territoires colonisés d'Afrique a motivé les chercheurs de l'ORSTOM à se tourner vers l'hydrologie d'autres régions tropicales, d'abord en Amérique du Sud, puis en Asie du Sud-Est. La première étude hydrologique de l'ORSTOM en Amérique du Sud a été entreprise par Dubreuil (1966) sur le bassin du Jaguaribe dans la région du Nordeste au Brésil.

Dans les régions méditerranéennes les premiers travaux ont concerné le Maghreb (Tunisie et Maroc).

### **Recherche en partenariat.**

Après une décennie durant laquelle les activités de recherche ont pris le pas sur les objectifs opérationnels, l'ORSTOM, devenu IRD en 1999, a reçu pour mission de conduire seulement des actions scientifiques en partenariat avec les pays en développement et d'impliquer de plus en plus les partenaires académiques de la communauté scientifique globale.

Une nouvelle génération d'hydrologues africains a été impliquée dans le programme FRIEND-Water du Programme Hydrologique International (PHI, IHP en anglais) de l'UNESCO (FRIEND = *Flow Regimes from International Experimental and Network Data*), dont la composante pour l'Afrique de l'Ouest et Centrale a démarré en 1995 (Servat *et al.* 1998). Il faut noter que l'implication de chercheurs de l'ORSTOM-IRD dans FRIEND-Water découle d'une longue participation antérieure à l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (AISH, IAHS en anglais), débutée avec Jean Rodier qui a consacré sa vie à mesurer et comprendre l'hydrologie tropicale et a publié un livre reconnu dans une collection de l'IAHS : *World catalogue of maximum observed flood* (Rodier et Roche 1984). Après des décennies de participation des hydrologues de l'ORSTOM-IRD aux activités de l'IAHS et une participation croissante des collègues africains et de leurs recherches sur l'hydrologie tropicale (Amoussou *et al.* 2021), le bureau de l'IAHS a institué un bureau régional pour l'Afrique en 2018, inaugurant le premier comité régional de l'IAHS.

Cela a encouragé les hydrologues sud-américains à se focaliser sur des sujets spécifiques et a conduit à la création d'un comité régional de l'IAHS pour l'Amérique Latine en 2023. Ces événements ont été accompagnés d'une valorisation de la reconnaissance internationale des spécificités de l'hydrologie tropicale au sein de l'IAHS, comme de son importance dans la compréhension du cycle de l'eau terrestre global. Les hydrologues de l'ORSTOM-IRD ont indubitablement joué un rôle significatif dans la construction et dans la formation de la communauté scientifique régionale d'hydrologues en Afrique de l'Ouest, du Nord et Centrale, et ont aidé à accélérer le partage de connaissance.

### **Grands programmes internationaux**

L'importance du cycle tropical de l'eau dans le climat de la Terre a aussi été au cœur de certains grands programmes internationaux, mis en place sous l'égide du *Programme Mondial de Recherche sur le Climat* (WCRP, en anglais) pour mieux comprendre les interactions entre l'atmosphère, l'eau et les surfaces continentales qui induisent le climat des régions tropicales en lien avec leur bilan d'énergie. Plusieurs équipes de l'IRD ont participé à ces programmes, en Afrique comme en Amérique du Sud, comme cela est présenté dans la section 4. Au début des années 2000, la création en France de *Services Nationaux d'Observation* (SNO, <https://www.insu.cnrs.fr/fr/les-services-nationaux-dobservation/>) a adopté la philosophie des *Programmes Hydroclimatiques Régionaux*, même s'ils ne concernaient pas seulement l'hydroclimatologie.

Durant la même période (années 1990 et début des années 2000) des observatoires à long-terme orientés vers la recherche ont été déployés comme une contribution à ces programmes

internationaux (par exemple : AMMA-CATCH, HYBAM, Glacioclim ; voir section 3 ci-dessous). Plus tard à la fin de la décennie 2000, le concept de *zone critique* a progressivement émergé et les observatoires mentionnés plus haut ont été inclus dans le réseau français OZCAR (*Observatoire de la Zone Critique : Application et Recherche*) d'observatoires de la zone critique, lequel fait partie d'une entité européenne plus large, eLTER-RI (<https://elter-ri.eu/>).

### Nouveaux instruments.

Tout au long des 80 années de campagnes de mesure de terrain évoquées dans cet article, il y a eu une amélioration technologique continue, que ce soit dans le domaine de l'instrumentation *in-situ*, de l'accès aux données de télédétection satellitaire ou des moyens de calcul. Il n'y a pas assez de place dans un simple article pour citer tous les nouveaux outils qui ont permis d'exploiter de la meilleure manière possible les observations de terrain afin d'améliorer les connaissances. Mentionnons seulement que les hydrologues de l'ORSTOM-IRD ont contribué à développer de nouveaux instruments, comme par exemple le mini-simulateur de pluies (Figure 2) pour caractériser la surface des sols et leurs propriétés hydrauliques, qui a permis de tester la sensibilité à l'écoulement d'une grande variété de surfaces dans l'environnement tropical (Casenave et Valentin 1992).



Figure 2 : Structure pyramidale d'un simulateur de pluie dans un environnement sahélien typique pendant la saison sèche - Mare d'Oursi, Burkina Faso. Les bâches bleues protègent la pluie simulée du vent fort. Mars 1981. Photo : P. Chevallier©IRD

Ils ont aussi adopté très tôt :

- l'utilisation d'images satellitaires Landsat pour cartographier les usages du sol et caractériser les territoires ;
- la mise en œuvre pionnière de *modèles numériques de terrain* pour identifier et localiser les chemins de l'eau (Quinn *et al.* 1991) ;
- la mise en évidence d'indicateurs géochimiques comme un moyen de mieux comprendre les mécanismes de transfert à l'interface sol-végétation-atmosphère (Bariac *et al.* 1995) ;
- l'emploi de modèles physiques de haute résolution dès le début des années 1980 en tirant parti des avancées décisives dans les capacités de calcul et en produisant des simulations 3D avec un couplage de la surface, du sol et des aquifères (voir par exemple : Girard *et al.* 1981).



### 3. Décrire, comprendre et modéliser les processus hydrologiques

#### Les bassins versants représentatifs et expérimentaux.

Comme évoqué dans la section 2, l'ORSTOM a lancé en 1955 un ambitieux programme sur ce que l'on a appelé les *Bassins Versants Représentatifs et Expérimentaux* (BVRE). Durant une trentaine d'années, au moins 120 BVREs ont été instrumentés pour des périodes allant de 3 à 5 ans en Afrique de l'Ouest et Centrale (Nouvelot 1993) avec pour objectif principal d'évaluer la dépendance des pics de crue à différents types d'occupation des sols, de conditions climatiques et de taille de bassins (Rodier et Auvray 1965). Les bassins versants étaient classés en 5 catégories en fonction de leur degré de perméabilité. De plus, un critère de pente était utilisé en combinant les pentes longitudinales et transversales. Tout cela a conduit à une série d'abaques dont le but était d'extrapoler les résultats à des bassins non jaugés pour estimer la crue de retour décennale. La *méthode Rodier-Auvray* a été largement utilisée pour le dimensionnement d'infrastructures jusqu'à la fin des années 1990. Au sein de ce programme BVRE, il convient de considérer avec une mention spéciale le bassin versant de Waraniene-Korhogo suivi pendant 10 ans (1962-1972) dans la savane ouverte du nord de la Côte d'Ivoire. Il a en effet permis une évaluation de l'impact d'un changement d'occupation du sol sur le régime hydrologique (Camus *et al.* 1976) en s'intéressant à la caractérisation du processus de ruissellement/infiltration, en lien avec le travail pionnier de Horton (1933). A partir de là, il est apparu clairement qu'une connaissance approfondie des propriétés des sols, de la topographie et de la couverture végétale était la clé pour comprendre les fonctionnements hydrologiques de ces bassins tropicaux (Dubreuil 1986).

A la fin des années 1970 et au début des années 1980, de nouveaux bassins ont été choisis pour explorer plus systématiquement les interactions entre les sols, la végétation et l'hydrologie :

- dans les zones arides du Sahel africain (Chevallier *et al.* 1985) et du Nordeste brésilien (Cadier 1993) ;
- dans la savane humide de Côte d'Ivoire (Hyperbav 1990) ;
- dans la forêt tropicale de Guyane (Fritsch 1992).

Le défi d'identifier les chemins de l'eau qui contrôlent le débit devint la question centrale, en s'intéressant tout particulièrement au concept d'organisation des sols sur les versants, tel que défendu par Kirkby (1988). D'autres études ciblaient les effets des pratiques agricoles sur les écoulements de surface et de subsurface. Les travaux de Perez *et al.* (1998), Castro *et al.* (1999) Nasri *et al.* (2004) et Al Ali *et al.* (2008) sont des exemples d'acquisition de connaissances dans des environnements variés (Afrique de l'Ouest, Amérique du Sud et Maghreb).

#### Approches régionales.

L'histoire des BVRE a trouvé une suite avec les programmes régionaux de terrain comme HAPEX-Sahel et AMMA (Lebel *et al.* 2010 – voir aussi ci-dessous dans la section 4) qui ont conduit à une meilleure compréhension de la variabilité du cycle de l'eau sahélien et soudanien et à une amélioration de la paramétrisation pluie-débit à l'échelle locale.

A l'échelle des grands bassins fluviaux, des programmes régionaux comme le programme Friend-Water en Afrique de l'Ouest et Centrale, avec la participation de plusieurs hydrologues de l'IRD, ont aussi contribué à l'amélioration des connaissances. Ces activités incluaient une base de données régionales ouverte à tous les membres du programme FRIEND-Water et un grand nombre d'hydrologues d'Afrique de l'Ouest et Centrale ont participé à ce programme. Les chercheurs de l'ORSTOM-IRD ont fortement soutenu la création de groupes africains FRIEND-Water depuis le démarrage du programme (Mahé *et al.* 2021). Cette approche en réseau a ensuite été élargie à la zone méditerranéenne (Servat *et al.* 2003).

#### Le paradoxe sahélien.

Ce contexte a permis d'identifier le *Paradoxe Sahélien* (Mahé *et al.* 2005). Il avait été observé depuis longtemps que les coefficients d'écoulement des petits versants sahéliens avaient

significativement augmenté dans les années 1970 et 1980 en Afrique de l'Ouest (Pouyaud 1987) en lien avec la réduction de la couverture végétale. L'hypothèse était que d'autres processus prenaient le relais de ce changement de comportement hydrologique en passant à l'échelle supérieure. Une première mise en question de cette hypothèse d'échelle est apparue lorsqu'on a observé que le niveau de la nappe sahélienne du Continental Terminal (CT3) a commencé à monter au début des années 1980 - c'est-à-dire pendant une période de sécheresse sévère (Leduc *et al.* 2001 ; Favreau *et al.* 2009) - sur toute la rive gauche de la partie sahélienne du fleuve Niger située dans le territoire de la République du Niger. Comme cet aquifère est rechargé essentiellement par des mares dans un environnement hydrologique endoréique, cela donnait une indication claire que l'augmentation du débit était un phénomène régional, qui élargissait la surface d'eau des retenues et des mares à partir desquelles l'eau s'infiltre vers l'aquifère. Ce raisonnement tient pour l'environnement semi-aride sahélien, mais plus vraiment dans des environnements plus humides où un réseau de drainage continu existe et où, factuellement, les écoulements des cours d'eau et les niveaux des aquifères ont diminué sévèrement, la diminution des écoulements de surface excédant largement celle des précipitations. Dans un contexte d'une sérieuse réduction de la précipitation annuelle, les hydrologues ont dû faire face au comportement contradictoire d'une augmentation du débit à l'exutoire des petits bassins sahéliens et d'une très forte diminution des écoulements des rivières dans les bassins tropicaux plus humides (Descroix *et al.* 2009).

Tout cela a conduit à faire la distinction entre deux domaines sous-régionaux caractérisés par des états de surface différents et des liaisons distinctes entre la surface et l'eau souterraine (Mahé *et al.* 2013) :

- la zone sahélienne – globalement au nord de la limite des 750 mm de cumul de précipitation annuelle jusqu'aux terres arides plus au nord – où le débit des cours d'eau provient pour l'essentiel du ruissellement de surface et où les périodes prolongées avec des précipitations faibles conduisent à une végétation et une biomasse réduites, entraînant la limitation de la capacité de rétention de l'eau du sol et l'augmentation du ruissellement direct ;
- l'Afrique de l'Ouest et Centrale tropicale humide où la baisse des précipitations conduit à une diminution durable du niveau de la nappe, laquelle à son tour apporte moins d'eau souterraine au débit des rivières.

Depuis les années 2000, ces observations ont été utilisées pour alerter les institutions nationales et internationales sur la nécessité de réviser toutes les normes hydrologiques servant au dimensionnement des infrastructures même en Afrique humide (Paturel *et al.* 2003).

Cependant une nouvelle question embarrassante a émergé lorsqu'on a observé que le niveau de la nappe du CT3 a continué de monter au cours des années 2000 et 2010, malgré le retour faible, mais significatif, des précipitations accompagnées d'un reverdissement de la végétation, jusqu'au point de devenir un facteur significatif d'inondations répétées et sans précédent dans de nombreuses grandes villes sahéliennes (Sighomnou *et al.* 2012). Il a fallu admettre que le paradoxe sahélien est de fait une réponse mixte aux changements de régimes de pluies – et plus spécifiquement à l'intensification hydroclimatique bien analysée par Panthou *et al.* (2014) – et à la dégradation des états de surface et de subsurface. La sécheresse a un impact majeur sur les arbres aux racines profondes en réduisant la capacité effective en eau du sol et en favorisant l'encroûtement superficiel (Paturel *et al.* 2017). Comme cela prend du temps pour que ce type de couverture végétale se régénère, l'effet sur le comportement du débit de surface s'est prolongé longtemps après le pic de sécheresse.

Afin d'explorer comment un changement de régime de précipitation se comporte face à ces facteurs de végétation, les données du site AMMA-CATCH du nord-Mali (Mougin *et al.* 2009) ont été exploitées pour identifier l'existence possible d'un point critique hydrologique qui pourrait marquer le début d'une nouvelle séquence hydrologique de long-terme au Sahel. En utilisant un modèle dynamique, Wendling *et al.* (2019) ont montré que l'hydrosystème sahélien présentait effectivement deux états alternés et que, au cours de la sécheresse, il basculait d'un



régime de pleine végétation/faible ruissellement à une alternative de faible végétation/ruissellement élevé, système dans lequel il se trouve installé jusqu'à maintenant.

### **Transport de sédiments.**

Le transport de sédiments a constitué également une préoccupation dès les années 1970 (Claude et Chartier 1977). Un important programme de recherche/développement a été mis en œuvre dans la région montagneuse du centre-nord de la Tunisie, avec l'objectif de protéger et d'améliorer les capacités de stockage de barrages construits à l'exutoire de petits bassins versants (Albergel *et al.* 2004). Le transport solide à l'échelle des bassins a aussi été un sujet de recherche en Afrique subsaharienne, notamment dans les bassins du Sénégal, du Niger et du Congo (Picouet *et al.* 2001 ; Laraque *et al.* 2009).

Finalement une expérimentation de grande échelle a été conduite au Cameroun au début des années 2000 au cours de laquelle le transport solide a été étudié durant 3 années sur 6 grands bassins distribués dans une large gamme de bioclimats depuis le nord sahélien jusqu'à la forêt équatoriale du sud en traversant les plateaux et la région montagneuse centrale (Lienou *et al.* 2005). Cette étude a aidé à mieux décrire comment le transport solide dépendait des changements hydroclimatiques majeurs en Afrique Centrale où de petits changements de précipitations lors du printemps boréal ont conduit à une importante diminution des débits printaniers des grands cours d'eau du sud-Cameroun, du Gabon et du Congo (Lienou *et al.* 2008), mettant en évidence que même l'Afrique équatoriale très humide était le siège de changements hydroclimatiques, en lien avec le changement global (Bogning *et al.* 2020). Plus tard, la reconstitution des transports de sédiments à l'océan a démontré que la plupart du sable était piégé dans des dépressions et n'atteignait plus les côtes, accélérant ainsi l'érosion côtière et augmentant la vulnérabilité du littoral à la submersion (Kotti *et al.* 2018 ; Hzami *et al.* 2021 ; Hadour *et al.* 2021). Au cours de la dernière décennie, les pays du Maghreb ont mené plusieurs programmes pour étudier le transport solide en lien avec la sédimentation dans les retenues, montrant par exemple au Maroc que la plupart des sédiments piégés dans les retenues provenait des berges de ces mêmes retenues, plutôt que des cours d'eau s'écoulant dans les dépressions (Hallouz *et al.* 2018 ; Ezzaouini *et al.* 2020), aidant ainsi à l'élaboration de programmes complémentaires pour la conservation des sols.

### **Estimation de l'évaporation.**

En sus de la recherche importante et intensive centrée sur une meilleure compréhension du devenir de l'eau une fois au sol, on ne doit pas oublier que les mécanismes d'échanges d'eau entre la surface continentale et l'atmosphère ont aussi retenu l'attention. Des observations pionnières de l'évaporation ont été conduites dans la région du lac Tchad (Riou 1967) et plus tard en Afrique Centrale (Riou 1972) en utilisant la méthode du rapport de Bowen pour relier de manière fiable les bilans d'énergie et hydrologique (voir aussi Pouyaud 1979). Concernant les précipitations, les mesures étaient systématiques sur les BVRE, mais c'est seulement à la fin des années 1980 que des campagnes spécifiques ont été organisées pour étudier la structure spatiale multi-échelle des champs de précipitation en utilisant une combinaison de mesures au sol, par radar et par satellite (Lebel 1997).

### **Hydrologie de haute montagne.**

Au début des années 1990 les hydrologues de ORSTOM ont débuté des études de processus hydrologiques dans un environnement bien différent : les montagnes de haute altitude des Andes (Ribstein *et al.* 1995), et plus tard de l'Himalaya. Ces recherches s'intéressaient au bilan hydrologique des bassins englacés de basse latitude et aux composantes du bilan de masse glaciaire. Des résultats particulièrement intéressants ont été obtenus sur la phase et la distribution des précipitations en fonction de l'altitude (Savéan *et al.* 2015), le détail des composantes du bilan hydrologique (Caballero *et al.* 2004 ; Mimeau *et al.* 2019) ou le rôle de la sublimation et des flux turbulents (Wagnon *et al.* 2009 ; Litt *et al.* 2015 ; Autin *et al.* 2022).

## L'eau et la ville.

A côté de ce survol rapide des recherches sur les bassins versants menées par les chercheurs de l'ORSTOM-IRD, nous devons aussi mentionner leur engagement en hydrologie urbaine. Pour des raisons à la fois physiques et socio-économiques, les grandes villes des pays en développement ont dû faire face depuis des décennies à des défis énormes d'assainissement et de contrôle des crues. Les premières mesures dans des villes africaines datent des années 1950 et 1960 sur le bassin de Makelekele à Brazzaville (Congo) (Herbaud 1966a) et de Gounti-Yena à Niamey (Niger) (Herbaud 1966b). A la fin des années 1970 et au début des années 1980, de nouveaux bassins expérimentaux ont été mis en œuvre dans plusieurs capitales africaines (Ouagadougou, Burkina Faso ; Niamey, Niger ; Lomé, Togo (Figure 3) ; Cotonou, Bénin ; quartier de Yopougon à Abidjan, Côte d'Ivoire) à la demande du CIEH.

Cet effort a été motivé par une accélération de la croissance de ces très grandes villes à l'origine d'une augmentation de la fréquence des crues et des dégâts associés. Ces campagnes se situaient dans le contexte d'une émergence de l'hydrologie urbaine en France et ailleurs au début des années 1970 due à une préoccupation montante pour les conditions hydriques spécifiques des environnements urbains (Desbordes 1974 ; Chocat 1978). Au total 16 bassins expérimentaux urbains ont été suivis par l'ORSTOM en Afrique de l'Ouest entre 1977 et 1987. En complément de ces bassins, des expérimentations de simulation de pluies ont été entreprises dans quatre de ces villes en 1985-1986 pour caractériser les propriétés hydrodynamiques des sols urbains, en gardant à l'esprit qu'une large proportion des zones urbaines en Afrique est en terre battue. Ces mesures ont conduit au développement de formules et de modèles pour calculer les crues de projet dans les villes africaines (Bouvier et Desbordes 1990 ; Bassel 1995 ; Miller *et al.* 2022 ; Chahinian *et al.*, 2023).



Figure 3. Collecteur à ciel ouvert sur le côté d'une rue à Lomé, Togo dans les années 1980. Ce type de collecteur est encore très largement utilisé dans les villes africaines. Photo : C. Bouvier©IRD

Une autre approche a été proposée avec une modélisation spatiale basée sur une représentation en *systèmes d'information géographique* (SIG) qui peut simuler de façon fine les écoulements sur une ville entière et détecter les débordements des structures de drainage (Bouvier *et al.* 2017 ; Diémé *et al.* 2022). Dans le cadre d'un projet financé par la Banque Mondiale, de tels modèles SIG associés à un réseau dense de pluviomètres équipés d'un système de télétransmission ont permis l'implémentation de démonstrateurs de prévision en temps réel à Ouagadougou, Burkina Faso et à Bamako, Mali.

L'IRD poursuit actuellement ce travail à Dakar, Sénégal (projet *Changement Climatique et Cycle de l'Eau*) et à Abidjan, Côte d'Ivoire (projet *Evidence*), en mettant en avant la co-construction avec des hydrologues africains, et leur formation. Une communauté scientifique

et technique solide est plus que jamais nécessaire à un moment où les villes africaines croissent à une vitesse sans précédent.

## 4. La perspective régionale

### Observation locale et suivi des régimes hydrologiques

Le cycle global de l'eau a longtemps posé des questions embarrassantes aux scientifiques, les grecs notamment qui se demandaient comment l'eau retournait à l'atmosphère après avoir été précipitée sur la Terre. Toutefois dans la période récente, l'hydrologie s'est surtout développée comme une science de l'ingénieur privilégiant les études locales dans l'objectif de fournir des outils pour un accès fiable et sûr aux ressources en eau et de protéger les sociétés contre les crues et les inondations. L'hydrologie à l'ORSTOM-IRD n'a pas échappé à cette tendance, mais il y avait aussi une volonté de documenter l'hydrologie régionale des grandes rivières d'Afrique de l'Ouest et Centrale en rassemblant et en synthétisant les observations disponibles sur les paramètres clés du bilan hydrologique dans une collection de *Monographies* (Tableau 1).

Tableau 1: Inventaire des "Monographies Hydrologiques" publiées par les Editions de l'ORSTOM-IRD (dans le cas où il y a eu plusieurs éditions successives pour le même bassin ou la même région, seule la dernière est mentionnée)

| Bassin or région             | Date de Publication | Auteurs  |
|------------------------------|---------------------|--|
| Niger, le delta intérieur    | 1960                | Auvray, C.   |
| Niari                        | 1965                | Hiez, G., Billon, B., Touchebeuf, P., Chaperon, P.   |
| Logone                       | 1966                | Billon, B., Bouchardeau, A., Roche, M., Rodier, J., Callède, J., Jarre, P., Pieyns, S., Riou, C. |
| Bandama                      | 1972                | Camus, H.  |
| Delta de l'Ouémé             | 1972                | Colombani, J., Sircoulon, J., Moniod, F., Rodier, J.   |
| Chari                        | 1974                | Billon, B., Guiscafne, J., Herbaud, G., Oberlin, G.  |
| Sanaga                       | 1975                | Dubreuil, P., Guiscafne, J., Nouvelot, J.C., Olivry, J.C.  |
| Martinique                   | 1976                | Guiscafne, J., Klein, J.C., Moniod, F.   |
| Volta                        | 1977                | Moniod, F., Pouyaud, B., Séchet, P.  |
| Gabon                        | 1978                | Carré, P.  |
| Medjerdah                    | 1981                | Rodier, J.A., Colombani, J., Claude, J., Kallel, R.  |
| Guadeloupe                   | 1985                | Chaperon, P., L'Hote, Y., Vuillaume, G.  |
| Cameroun                     | 1986                | Olivry, J.C.   |
| Niger (2 volumes)            | 1986                | Brunet-Moret, Y., Chaperon, P., Lamagat, J.P., Molinier, M.                                      |
| Oueds Zéroud et Merguellil * | 1986                | Bouzaiane S., Lafforgue, A.  |
| Cap Vert                     | 1987                | Olivry, J.C.   |
| Gambie                       | 1987                | Lamagat, J.P., Albergel, J., Bouchez, J.M., Descroix, L.   |
| Likouala Mossaka             | 1987                | Thiébaux, J.P.   |
| Bénin                        | 1993                | Le Barbé, G., Alé, G., Millet, B., Texier, H., Borel, Y., Gualde, R.                             |
| Madagascar                   | 1993                | Chaperon, P., Danloux, J., Ferry, L.   |
| Lac Tchad                    | 1996                | Olivry, J.C., Chouret, A., Vuillaume, G., Lemoalle, J., Bricquet, J.P.                           |
| Oubangui                     | 2010                | Callède, J., Boulvert, Y., Thiébaux, J.P.  |
| Sénégal                      | 2014                | Bader, J.C. (éd.)  |

\* Coédition avec le Ministère tunisien de l'Agriculture.

Mesurer le débit à l'exutoire de grands cours d'eau tropicaux comme l'Amazone (Jaccon et al. 1987) ou le Congo (Pouyaud 1972 ; Molinier 1979) était un vrai défi, relevant de l'exploration (Figure 4). Les hydrologues de l'ORSTOM ont été les premiers à utiliser un ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) pour des mesures en Amérique du Sud quand ils ont débuté des jaugeages à l'embouchure de l'Amazone à l'aval d'Obidos (Kosuth *et al.* 2019). Progressivement de nouveaux développements technologiques au sol et des observations satellitaires ont permis des suivis de routine plus précis des débits et du transport solide des grands cours d'eau (Mangiarotti et al. 2013 ; Emery et al. 2022). Bien qu'innovantes en termes d'échelle spatiale, ces études régionales restaient cantonnées à la résolution de questions pratiques sur le contrôle des crues, l'alimentation en eau domestique ou la santé publique. Le *Programme Onchocercose* de l'Organisation Mondiale de la Santé est un exemple emblématique de ce type de grands programmes ciblant un problème de santé publique en Afrique de l'Ouest tropicale humide (Hougard et al. 2001) (Figure 5).



*Figure 4 : Vue aérienne du Congo à Maluku-Tréchet à l'amont du Pool Malebo, où les mesures de débit étaient réalisées dans les années 1970. Septembre 1985. Photo : P. Chevallier©IRD*



*Figure 5 : Programme Onchocercose de l'Organisation Mondiale de la Santé. Suivi par hélicoptère d'une rivière infestée dans le Parc National d'Arly, sud-est du Burkina Faso. Août 1978. Photo : P. Chevallier©IRD*

### **Projets hydroclimatiques régionaux**

Par la suite, au début des années 1990, dans la ligne du travail pionnier d'Eagleson (1978), la compréhension scientifique des mécanismes est devenue un principe central d'organisation, défendu par la composante GEWEX (*Global Energy and Water Exchanges*) du WCRP. GEWEX promouvait les *Projets Hydroclimatiques Régionaux* (PHR) comme outil essentiel de compréhension et de prévision des hydroclimats, requérant la mise en commun de plusieurs disciplines concernées par les problèmes d'eau. Les régions de basse latitude sont bien sûr des *hot spots* pour de tels projets, en tant que producteurs clés d'énergie dans le climat terrestre offrant un fort couplage entre le bilan d'énergie des surfaces continentales et le bilan hydrologique (Koster *et al.* 2004).



## Le Sahel.

La première opération GEWEX en milieu tropical, Hapex-Sahel, a été entreprise dans le Sahel d'Afrique de l'Ouest en 1991 dans une initiative conjointe de Météo-France, de la NASA et de l'ORSTOM (Goutorbe *et al.* 1994). Hapex-Sahel était une étude de l'interaction entre la surface continentale et l'atmosphère à méso-échelle, bâtie par l'ORSTOM sur un programme d'observation de la pluie régionale au Niger (Lebel *et al.* 1992). Un ensemble complet d'instrumentation hydrométéorologique a été déployé avec des stations de mesure de flux, des capteurs d'humidité des sols, des observations de niveau d'eau dans les réservoirs, des radiomètres et des survols aériens instrumentés. Hapex-Sahel ouvrait la voie pour le tout premier PHR tropical, qui s'est déroulé de 2001 à 2010 sur toute l'Afrique de l'Ouest y compris ses limites océaniques et atmosphériques : le projet *Analyse Multidisciplinaires de la Mousson Africaine* (AMMA) (Redelsberger *et al.* 2006). Un produit intéressant de ce PHR ouest-africain était de fournir une base scientifique et des moyens financiers pour promouvoir un système régional hydroclimatique d'observation à long-terme, *Analyse Multidisciplinaires de la Mousson Africaine – Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique* (AMMA-CATCH), (<https://amma-catch.osug.fr>), afin d'échantillonner le gradient éco-climatique ouest-africain (Lebel *et al.* 2009 ; Galle *et al.* 2018) (Figure 6).

Le jeu de données du Niger représente à lui seul aujourd'hui 35 ans de données de précipitation à haute résolution (espacé de 30km avec un pas de temps de 5 minutes), sans aucun autre équivalent en Afrique sub-saharienne. Ces données sont très utilisées pour documenter l'évolution multi-échelle du régime de précipitation au Sahel dans un contexte de réchauffement climatique, mettant en évidence une forte intensification (Chagnaud *et al.* 2022). AMMA-CATCH fournit aussi les plus longues mesures de flux en cours en Afrique (AMMA-CATCH 2005). Le croisement de ce jeu unique de données avec d'autres mesures hydrologiques acquises sur l'observatoire a permis de s'intéresser à toute une série de questions scientifiques importantes comme le rôle de différents facteurs climatiques et de couverture du sol sur les mécanismes d'hydrologie de versant (Richard *et al.* 2013) ou le cycle hydrologique à méso-échelle (Peugeot *et al.* 2011) sur un bassin de 14 000 km<sup>2</sup> (Ouémé supérieur, nord-Bénin).



Figure 6 : Banizoumbou, Niger. Tour de mesure des flux turbulents dans un environnement sahélien, faisant partie des campagnes de terrain AMMA et de l'observatoire à long-terme AMMA-CATCH. Mai 2006. Photo : T. Lebel©IRD

Dans cette région au climat soudanien, l'écoulement est marginalement hortonien et étroitement contrôlé par les processus de zone non-saturée, tout particulièrement l'écoulement de subsurface qui apporte la principale contribution au débit des cours d'eau (Giertz et Diekkruger 2003). La modélisation réalisée par Herzog *et al.* (2021) avec un modèle de zone critique (Parflow-CLM à la résolution de 1x1km<sup>2</sup>) sur une large gamme des données

hydrométéorologiques AMMA-CATCH a permis d'explorer le rôle de la partie supérieure de l'horizon d'altération (argile et végétation) et des propriétés hydrauliques de l'aquifère dans le contrôle des écoulements de la rivière. Cela confirmait en sus que la couverture arborée joue un rôle clé dans l'appauvrissement saisonnier de la nappe, par les prélèvements des racines profondes dans cette région.

### **Le lac Tchad.**

Une autre entité hydrologique emblématique de l'Afrique subsaharienne est le lac Tchad, dans le Sahel Central. Les hydrologues de l'ORSTOM ont travaillé dès les années 1950 sur le lac et ses tributaires (Figure 7). Après avoir été recensé comme la sixième plus grande étendue d'eau intérieure de la Terre avec une surface d'eau libre de 25 000 km<sup>2</sup> dans les années 1960, il diminua dramatiquement au début des années 1970 pour se réduire à moins de 2 000 km<sup>2</sup> dans les années 1980. Toutefois au cours des dernières 20 années la surface du lac Tchad a repris environ 24 % (Mahamat Nour *et al.* 2021). Cette récupération est un bon exemple d'effet de l'intensification hydroclimatique évoquée plus haut résultant de grosses crues répétées : en 2022, 19 des 23 provinces du Tchad dans la partie sud du bassin ont été inondées avec près de 1,5 millions de personnes affectées et 350 000 ha de terre dévastée. De par sa situation à la confluence du Chari et du Logone, la capitale N'Djaména est très exposée (Gbetkom *et al.* 2022). En 2022, plus de 250 000 personnes ont été concernées par l'inondation et ont dû être secourues par l'aide humanitaire. L'année suivante, le Tchad s'est déclaré en état d'urgence le 19 octobre 2023.



Figure 7 : Vue aérienne du Delta du Chari dans le lac Tchad. Février 1978. Photo : M. Roche©IRD

### **Le bassin amazonien.**

En Amérique du Sud les premières études datent des années 1960 sur le Rio São Francisco (Dubreuil 1960) et pendant des années, elles ont été réalisées dans le Nordeste, avec la première recherche sur le Rio Jaguaribe (Dubreuil 1962). Les hydrologues de l'ORSTOM ont seulement commencé à travailler avec leurs collègues brésiliens sur le bassin de l'Amazone dans les années 1980 (Callède *et al.* 1985). De nombreuses autres recherches ont concerné le bassin supérieur de l'Amazone dans d'autres pays (Bolivie, Pérou, Equateur) et bien plus tard l'Orénoque.

Sur la base de ces expériences et après un premier programme international PIRAT (Olivry 1989), l'idée a émergé de créer un réseau international du bassin de l'Amazone. Le programme international *Hidrologia da Bacia Amazônica* (HIBAM), lancé en 1993 (Molinier *et al.* 1993), était essentiellement expérimental en promouvant les observations hydrologiques de la *Large-Scale*-

*Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia* (Avissar et Nobre 2002). Ce gros effort international a, parmi d'autres résultats majeurs, renforcé l'intuition que la déforestation du bassin amazonien influençait très significativement son hydroclimatologie, mais aussi celle d'autres endroits de la Terre (Avissar *et al.* 2002).

Un programme d'observation à long-terme du bassin amazonien, *HYdrologie du Bassin AMazonien* (HYBAM) (<https://hybam.obs-mip.fr/>) a été lancé dans la continuité en 2003 par l'IRD et ses partenaires sud-américains (Cochonneau *et al.* 2006) pour documenter la variabilité à long-terme et les tendances du plus grand système hydrologique de la Terre, avec une prise en compte particulière du transport solide (Moquet *et al.* 2016 ; Vauchel *et al.* 2017). En 2008, HYBAM a été labellisé comme faisant partie du réseau français d'observatoires (Guyot 2008). Opérationnel dès 2003 et focalisé sur l'observation des cours d'eau et des ressources en eau en Amazonie (Figure 8), HYBAM a entrepris des mesures hydrologiques, sédimentaires et hydrochimiques à long-terme pour comprendre l'origine et l'évolution de l'eau et des matériaux transportés (sédiments, matière organique, nutriments, etc.) dans les rivières amazoniennes depuis la Cordillère des Andes jusqu'à l'Océan Atlantique. Ce réseau a inclus d'autres fleuves qui coulent aussi vers l'Atlantique Tropical : l'Orénoque, le Maroni et l'Oyapock en Amérique du Sud et le Congo en Afrique. Depuis lors, HYBAM a accumulé un volume significatif d'informations sur les fleuves tropicaux et des articulations institutionnelles avec les pays du bassin amazonien (agences et universités), ainsi que des actions sur l'Orénoque et même le Congo, en complétant les dispositifs de suivi expérimental menés par les entités nationales.



Figure 8 : « Encontro das Aguas ». Confluence du Rio Negro (eau sombre) et du Rio Solimões (eau boueuse) à l'aval de Manaus (Brésil). Février 1993. Photo : P. Chevallier©IRD

Héritier de l'élan régional apporté par HYBAM et basé sur les différentes études climatiques associant les processus de surface et atmosphérique entre le bassin amazonien et la Cordillère andine un nouveau PHR, ANDEX (<https://www.gewex.org/project/andex/home/andex-rationale/>) (Segura *et al.* 2020), a été lancé en 2020 par la communauté internationale. Il a pour but de comprendre, modéliser et prévoir la dynamique des cycles de l'eau et de l'énergie sur la Cordillère des Andes pour une large gamme d'échelles temporelles et spatiales, ainsi que leurs relations avec les océans, les surfaces continentales et les grands bassins fluviaux qui l'entourent (<https://www.gewex.org/project/andex/science/white-book/>). Cette vision intégrative des processus hydroclimatiques de base et de la variabilité climatique est essentielle, pour faire face aux défis urgents portés par le changement climatique anthropogénique, ainsi que par les changements d'usage des terres et la déforestation le long des Andes.



## Neige et glaciers : Andes et Himalaya

Parmi d'autres initiatives récentes des chercheurs de l'IRD avec leurs partenaires locaux, les systèmes d'observation Glacioclim (<https://glacioclim.osug.fr/>) et Cryobsclim doivent être tout spécialement évoqués. Avec l'émergence du problème du réchauffement global, l'avenir de la cryosphère dans les chaînes de montagnes des basses latitudes avait été identifié dès les premiers rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), comme un défi scientifique et sociétal majeur, à cause de son rôle critique dans la constitution des régimes hydrologiques et des ressources en eau de quelques-uns des plus grands bassins de la planète. Pendant que l'extension des glaciers et de la couverture neigeuse se réduit dans les Tropiques *stricto-sensu*, (Andes centrales, Afrique de l'Est, Papouasie), c'est une composante majeure des paysages dans l'Hindu-Kush Himalaya et en Asie Centrale, lesquels sont aussi concernés par les régimes climatiques de mousson, typiques de régions tropicales. La difficulté de conduire des observations scientifiques dans ces régions difficiles d'accès, où des conditions climatiques sévères prévalent, explique pourquoi elles sont pauvrement documentées.

Même si la télédétection satellitaire est un instrument de plus en plus utilisé pour mesurer le retrait des glaciers à travers la planète, les mesures *in-situ* sont encore cruciales pour établir des bilans de masse fiable et pour valider les modèles. C'est pourquoi des glaciers lourdement instrumentés sont utilisés à la fois comme indicateurs hydroclimatiques et comme base pour les études de processus dans cet environnement très spécifique. A cette fin la composante Great-Ice (*Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes Tropicales – Indicateurs Climatiques et Environnementaux*) de Glacioclim (Sicart *et al.* 2015) a suivi deux glaciers tropicaux et les bassins versants associés : l'un depuis 1991 dans les tropiques externes (glacier du Zongo en Bolivie) et l'autre depuis 1997 dans les tropiques internes (glacier de l'Antizana en Equateur). Cet observatoire a déjà fourni une large gamme de résultats, depuis les études de processus (Autin *et al.* 2022 ; voir aussi la section 3 plus haut), jusqu'à l'impact de la réduction des glaciers andins sur les ressources en eau (Soruco *et al.* 2015).

Plus récemment Cryobsclim a entrepris le suivi de deux glaciers en Himalaya les glaciers de Chhota Shigri (Azam *et al.* 2016) et du Mera, respectivement en Inde et au Népal. En associant les observations de terrain de Cryobsclim avec des mesures de télédétection, Brun *et al.* (2017) ont pu fournir une estimation du bilan de masse pour les glaciers de l'Himalaya-Karakoram soulignant des comportements contrastés entre l'ouest et l'est de l'Himalaya. C'est une information cruciale pour la calibration des modèles utilisés pour projeter la réponse des glaciers au changement climatique, sachant que ces modèles n'intègrent pas actuellement la caractérisation, l'ampleur et la variabilité intra-régionale des changements glaciaires.

## 5. Acquisition, traitement, analyse et gestion des données

### Amélioration constante des capteurs.

Dans de nombreuses régions de basse latitude des conditions climatiques difficiles font que c'est un défi de faire des mesures *in-situ*, spécialement quand une maintenance régulière des instruments est nécessaire. Les campagnes de BVRE requéraient pour cette raison la présence permanente sur site de techniciens et de chercheurs durant les saisons des pluies afin de minimiser les périodes de lacune de mesures avec les capteurs à enregistrement sur papier – pour la pluie comme pour les écoulements – depuis les années 1950 jusqu'aux années 1970. Mais au début des années 1980, les pluviomètres enregistreurs ont commencé à être équipés avec des ROM (*Read-Only Memories*) digitales, une technique que l'ORSTOM a contribué à développer avec l'entreprise privée Elsyde®. Cette technique a été utilisée à pleine échelle pour les campagnes EPSAT-Niger (*Étude des précipitations par satellite*) à partir de 1989, avec plus d'une centaine de pluviomètres enregistreurs installés sur une surface de 16 000 km<sup>2</sup> dans les environs de Niamey (Niger)

Les données obtenues alimentaient une base de données en quasi temps réel, produisant ainsi la composante fondatrice de ce qui deviendrait la base de données AMMA-CATCH, elle-même ayant été utilisée comme prototype des bases de données de SNO. Cette technique de stockage des données sur des ROM a progressivement équipé les stations des services

opérationnels en Afrique de l'Ouest et Centrale, permettant pour la première fois dans cette partie du monde d'alimenter directement des bases de données numériques, et d'éviter la tâche fastidieuse de digitalisation des enregistrements sur papier. A la fin des années 1990, le système des ROM a commencé à être remplacé par des systèmes plus pratiques ; les nouveaux terminaux permettaient un premier contrôle des données avec une étape de correction possible, puis ensuite un transfert vers les bases de données.

Au cours de la même période des nouvelles techniques de transmission de données ont été développées basées sur des capteurs et des transmetteurs utilisés par la communauté des océanographes et des physiciens de l'atmosphère. En l'occurrence, dans le cadre du projet OMS-Onchocercose (voir section précédente) les stations étaient équipées avec des capteurs envoyant par satellite l'information minimale (date et heure, niveau d'eau) stockée dans la base de données. L'information collectée permettait une planification en quasi temps réel des traitements de rivière par voie aérienne, lesquels étaient conditionnés par les niveaux d'eau (Servat et Lapetite 1990). Toutes ces techniques pionnières de transmission automatisée ont aujourd'hui été remplacées par des systèmes plus robustes et au débit plus élevé.

### **Logiciels de traitement des données.**

En aval de cette automatisation progressive de l'acquisition et de la transmission de données, l'ORSTOM a développé des logiciels de traitement, comme Pluviom pour les précipitations et Hydrom pour les données d'écoulement (Raous *et al.* 1990) qui ont été largement distribués et utilisés par les services opérationnels et les laboratoires de recherche. Depuis lors de nombreux logiciels hydrométéorologiques ont été développés ici où là dans de nombreux pays, mais l'IRD a pu bâtir sur cette expertise passée de l'ORSTOM un nouvel outil d'analyse des précipitations extrêmes basé sur une approche multi-échelle d'espace et de temps (Panthou *et al.* 2014). C'est la pierre angulaire d'une composante du projet *Cycle de l'Eau et Changement Climatique* (<https://www.projet-cecc.org/>) qui permettra une révision des normes hydrologiques en Afrique de l'Ouest.

### **Bases de données et systèmes d'information.**

Les hydrologues de l'ORSTOM ont aussi contribué au développement de bases de données. Dès 1967 (Roche 1968), ils ont proposé une définition et une codification des stations de mesure, en appliquant les stratégies de standardisation recommandées par l'AFNOR (*Agence Française de Normalisation*) en lien avec les standards ISO. Lors de l'expérience HAPEx-Sahel (Goutorbe *et al.* 1994), les spécialistes ORSTOM des données se sont associés aux collègues de la NASA et de Météo-France pour créer l'une des toutes premières bases de données intégrées, utilisant une interface java pour rassembler des données météorologiques, hydrologiques et écologiques.

Depuis la fin des années 1990, les unités mixtes de l'IRD (dans l'organisation française de la recherche publique, une unité mixte est partagée entre plusieurs établissements, y compris universitaires) ont hérité de cette base de données. Elle a été partiellement complétée par des données provenant de plusieurs sources : les services nationaux africains, le programme FRIEND-Water de l'UNESCO (avec des bases de données créées dans chacun des huit groupes régionaux), et des données provenant de programmes de recherche. La base de données SIEREM (*Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation*), a été alors bâtie et élargie à tous les pays d'Afrique avec 13 722 stations hydrologiques ou pluviométriques, datant de 1837 pour les premières observations jusqu'au présent (Boyer *et al.* 2006). Seules les métadonnées sont accessibles librement ; en effet SIEREM relaie toutes les demandes de données aux services nationaux. Mais SIEREM propose librement des données traitées sous la forme de grilles mensuelles (1940-1999 pour toute l'Afrique) (voir aussi ADHI, *African Datas of Hydrometric Indices*, Tramblay *et al.* 2021), un certain nombre de cartes (pluie, bassins, etc.), des données SIG concernant près de 400 bassins africains (limites de bassins, réseau hydrographique, capacités de rétention des sols dérivées de la FAO, couverture végétale, géologie), des photographies de nombreuses stations hydrologiques, des versions numérisées de nombreux documents techniques datant de la création des stations et des *monographies hydrologiques* pour près de 20 rivières et fleuves.

Tableau 2: Enregistrements de BVRE disponibles dans la base de données SIEREM (2018)

| Pays                      | Lieux<br>(bassins urbains en italiques)   | Enregistrements disponibles |              |
|---------------------------|---|-----------------------------|--------------|
|                           |   | Limnimètres                 | Pluviomètres |
| Bénin                     | Boukombe, Dodou, Lhoto, Tero, Djougou, Tiapalou<br><i>Cotonou</i>   |                             | 2            |
| Burkina Faso              | Bambassou, Gagara, Lac de Bam, Leraba, Manga,<br>Mare d'Oursi, Massili<br><i>Ouagadougou, Wentenga</i>  | 11                          | 26           |
| Cameroun                  | Méfou, Nooun, Ottotomo, Sanguere<br><i>Yaoundé</i>  | 19                          | 14           |
| Cap Vert                  | São Nicolau   |                             | 1*           |
| Congo                     | Comba   | 3                           | 4            |
| Côte d'Ivoire             | Booro Borotou (Hyperbav), Korhogo, Taï,<br>Sakassou,<br><i>Yopougon, Abidjan, Adiopodoumé, Bagatogo,<br/>Dioman, Mahandouni, Morondo, Odienné</i> | 14                          | 50           |
| Gabon                     | Nzémé   |                             | 2            |
| Ghana                     | Kulaw, Morago, Nabogo   | 3                           |              |
| Mali                      | <i>Bamako</i>   | 4                           | 14           |
| Mauritanie                | Dionaba, Ghorfa, Seloumbo   | 10                          |              |
| Niger                     | Badeguicheri, Goulbi de Gabi, Kountkousout,<br>Teloua Agadez, Vallée Keita<br><i>Niamey</i>   | 5                           | 4            |
| République Centrafricaine | Ngola, Sarki  | 9                           | 12           |
| Sénégal                   | Djiguinoum, Thyse Kaymor<br><i>Dakar, Podor, Tambacounda, Ziguinchor</i>  | 9                           | 18           |
| Tchad                     | Bade, Bam Bam<br><i>Ba Illi, Deli, Ndjamena, Bol Dune</i>   | 10                          | 10           |
| Togo                      | Koza, La Daye<br><i>Lomé</i>  | 2                           | 7            |

\* observation manuelle

NB. Seuls les enregistrements stockés dans la base de données SIEREM sont comptés. D'autres données de BVRE existent dans les archives, mais ne sont pas encore intégrées dans SIEREM ou ne sont pas numérisées. Plus de détails sont fournis sur le site web de SIEREM.

Une question majeure pour le proche avenir concerne la sauvegarde et la compilation d'observations infra-journalières. En effet, excepté pour les données de SNO qui sont archivées en quasi temps réel dans le système d'information THEIA (voir plus loin), seulement 25 % des données de BVRE sont stockées dans la base SIEREM (Tableau 2) et la plupart des données infra-journalières produites par les services opérationnels ne sont même pas numérisées, ou inaccessibles dans aucun système d'information. Faire que ces données à des pas de temps fins soient disponibles pour la communauté de recherche ou opérationnelle est un vrai défi, compte tenu de la diversité des données et des acteurs impliqués. Le projet IRN ActNAO de l'IRD et Friend-Water de l'UNESCO avec l'objectif de réévaluer les normes hydrologiques en Afrique de l'Ouest ou le comité Afrique de l'IAHS peuvent être des plateformes potentielles pour promouvoir des actions dans cette direction (Amani et Paturel 2017). Dans l'esprit du programme « DATA rescue » de l'OMM (<https://community.wmo.int/en/data-rescue>), l'IRN ActNAO est en train de valider l'utilisation d'un outil de numérisation du CEREMA (<https://www.cerema.fr/fr/actualites/logiciel-numerisation-enregistrements-graphiques-niveaux-eau>) en « sauvant » et valorisant les données pluviographiques des stations synoptiques de la Côte d'Ivoire (Paturel *et al.* 2024).

Aujourd'hui l'IRD est enthousiaste pour rejoindre le défi international de la science ouverte et du partage de données, et de nombreuses données sont déjà partagées publiquement, en particulier :

- le jeu de données AMMA-CATCH à partir de 2005 (<https://www.amma-catch.org/-Acces-donnees->),
- le jeu de données Paprika-Preshine dans la région de l'Everest (<https://doi.org/10.23708/000521/>),

- la base ADHI (*African Database of Hydrometric Indices*) archivée dans le dépôt *DataSuds* qui est l'un des éléments du système de science ouverte que l'IRD promeut (<https://doi.org/10.23708/LXGXQ9>).

Sur la base des données collectées, les hydrologues de l'ORSTOM-IRD se sont efforcés de fournir des synthèses à une échelle globale : par exemple pour les précipitations annuelles dans l'intervalle 1940-1999 sur toute l'Afrique (Mahé *et al.* 2012 ; Dieulin *et al.* 2019). Dans les années 1990, ils ont contribué en Afrique au projet *Water Resources Assessment* de l'Organisation Météorologique Mondiale. Plus tard, ils ont coordonné pour le bassin méditerranéen et les Caraïbes le *World Hydrological Observing System*, projet OMM visant à rationaliser régionalement les réseaux d'observation hydrologique.

Les SNO (voir sections 3 et 4) ont aussi généré d'importantes bases de données collectant les observations de terrain météorologiques et hydrologiques, comme les données spatialisées de télédétection acquises par les générations successives d'imagerie satellitaire. Ces données sont publiques et disponibles au travers de la plateforme THEIA (<https://www.theia-land.fr/>), qui fédère l'expertise scientifique à l'échelle nationale autour de cinq domaines majeurs : la cryosphère, les eaux continentales, l'occupation du sol, les agrosystèmes et la biodiversité, l'imagerie et la radiométrie.

### Deux actions exemplaires.

Finalement, deux actions pilotées par l'ORSTOM-IRD doivent être évoquées dans cette section parce que, derrière le fondement historique, elles reflètent l'esprit de co-construction qui a toujours habité l'institution ORSTOM-IRD et ses chercheurs.

Premièrement, le réseau RIO (*Réseau Informatique de l'ORSTOM*), lequel entre 1989 et 1995 a introduit les premiers services internet, en particulier l'e-mail, dans une douzaine de pays de l'Afrique subsaharienne : Sénégal, Mali, Niger, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Congo, Togo, Madagascar, Cameroun, Bénin et Guinée. En 1995, lorsque Internet est sorti de ses confins académiques, le projet RIO impliquait plus de 100 établissements dans 15 pays africains. Le projet a par la suite été éclipsé par les structures nationales, mais il aura montré, en particulier, qu'il était possible pour les pays les moins développés d'acquérir un savoir-faire techniquement avancé, alors que c'était encore en voie d'appropriation dans les métropoles technologiques ([https://www.rio.net/Rio\\_Innovation&CooperationV2.html](https://www.rio.net/Rio_Innovation&CooperationV2.html)).

Deuxièmement, la base de données *Horizon Pleins Textes*, une base bibliographique en ligne créée par l'ORSTOM-IRD (<https://horizon.documentation.ird.fr/exl-php/accueil/>), couvre toutes les disciplines de l'institut, pas seulement l'hydrologie. La base de données enregistre et donne accès aux publications des chercheurs de l'institut et aux co-publications avec les partenaires scientifiques du Sud, ainsi qu'aux catalogues de ses centres de documentation à travers le monde. Avec plus de 110 000 documents, dont 80 000 accessibles librement en ligne, elle permet la diffusion de l'héritage scientifique de l'IRD (les plus anciens documents datent des années 1940), mais aussi des progrès de la science avec plus de 3 000 nouvelles publications chaque année. Cette ressource contient une multitude d'informations et de données qui n'ont pas toujours été numérisées, y compris de nombreux rapports hydrologiques de terrain. C'est un héritage scientifique probablement unique au monde. Fin 2017, la collection documentaire de l'institut a reçu le label *collection d'excellence* dans le cadre du programme national CollEx-Persée<sup>1</sup> pour une période renouvelable de cinq ans (2018-2022). La base de données Horizon est dévolue au soutien d'une politique d'accès libre ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Horizon\\_Pleins\\_textes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Horizon_Pleins_textes)).

## 6. Discussion et conclusion

Cet article présente un bref aperçu de la manière dont les hydrologues de l'ORSTOM-IRD se sont impliqués au cours des 80 dernières années dans l'observation et la surveillance des différentes composantes du cycle hydrologique dans les régions de basse latitude, témoignant ainsi des évolutions majeures de l'hydrologie en tant que science et des défis socio-environnementaux auxquels sont confrontées les populations de ces régions. Des approches axées sur la résolution

de problèmes à une science fondée sur la compréhension, des études locales à un programme de changement global (Eagleson 1991), des mesures à court-terme et ciblées aux systèmes de surveillance à long-terme, les observations hydrologiques ont été réalisées à des fins diverses, dans différentes régions et à différentes échelles. Les hydrologues de l'ORSTOM-IRD ont formé des centaines d'hydrologues, de techniciens, d'ingénieurs et d'universitaires africains, issus des services nationaux, des lycées et des universités, souvent très innovants en matière d'instrumentation et d'utilisation des nouvelles technologies, comme les modèles hydrologiques informatiques, la transmission de données par satellite et, plus récemment, l'utilisation de l'altimétrie radar pour les bassins non jaugés. Ils ont également mis en place des réseaux hydrologiques nationaux dans plus de 30 pays ou territoires.

### **Une évolution diversifiée, mais cohérente**

En raison de cette grande diversité de motivations, qui ont évolué au fil du temps, il serait difficile de prétendre qu'une stratégie clairement définie a présidé à cet ensemble vaste de déploiements sur le terrain. De nombreuses questions techniques et scientifiques, répondant aux sollicitations des gouvernements et des agences, ont nourri la curiosité de groupes de chercheurs, qui ont saisi l'occasion de participer à de grands programmes internationaux et de partager leurs connaissances techniques et de terrain avec la communauté internationale. Malgré cette hétérogénéité des motivations et des configurations opérationnelles, le résultat est un ensemble impressionnant, bien que loin d'être exhaustif, de résultats et de réalisations qui contribuent à documenter les facettes fascinantes et diverses de l'hydrologie tropicale/méditerranéenne, en particulier en Afrique occidentale et centrale, en Amérique du Sud tropicale, au Maghreb et en Asie du Sud-Est, des terres subtropicales arides aux forêts équatoriales.

Historiquement, les activités de l'ORSTOM-IRD ont été largement dominantes en Afrique, en particulier en Afrique de l'Ouest, et dans une moindre mesure en Afrique centrale et en Afrique du Nord. C'est également en Afrique que le personnel de l'Institut a le plus travaillé, ce qui se reflète dans l'article.

Les extensions actuelles de ces régions traditionnelles d'intérêt comprennent le Mékong en Asie du Sud-Est, grâce à des partenariats avec des agences internationales au sein desquelles les hydrologues de l'ORSTOM-IRD ont partagé leur longue expérience dans la mise en place et la gestion de grands réseaux fluviaux, ainsi que les régions montagneuses de basse latitude, telles que l'Himalaya et les Andes, où ils ont été parmi les pionniers de l'exploration de l'hydrologie des hautes montagnes tropicales. L'héritage de cet investissement est à la fois scientifique et opérationnel, et il faut rappeler qu'il résulte de collaborations continues et fructueuses entre les scientifiques de l'ORSTOM-IRD et leurs partenaires dans de nombreux pays, soutenues financièrement pendant des décennies par le gouvernement français.

Il convient ici de souligner un point important. L'ORSTOM/IRD est, et a toujours été, une institution du gouvernement français dépendant de sa politique étrangère. Le choix des projets, des partenaires et des lieux d'intervention dépend donc largement de la stratégie géopolitique de la France ou de l'état des relations de la France avec les régions concernées. Par exemple : il est aujourd'hui (2020 et au-delà) extrêmement difficile, voire impossible, de mener des recherches sur le terrain dans des pays comme le Mali, le Niger ou le Burkina Faso ; le partenariat de la France avec les pays d'Asie du Sud-Est n'a repris qu'au cours des dernières décennies, après une longue période de tensions. Le cas des pays dits émergents, en particulier l'Inde, l'Afrique du Sud, le Mexique et le Brésil, où l'ORSTOM/IRD est parfois présent depuis longtemps, est très différent. Les équipes de recherche dans ces pays sont hautement qualifiées. Les chercheurs y travaillent désormais en étroite collaboration, partageant leurs ressources et leurs sites de terrain afin d'améliorer la connaissance des environnements physiques et humains des basses latitudes dans une perspective de développement durable mondial.

### **Partage et formation au centre de l'action en partenariat**

La volonté de partager les actions avec toutes les parties prenantes, depuis les premières observations *outré-mer* jusqu'aux recherches avancées en cours ou prévues, est évidente à

chaque étape de cette *histoire*. Timide et autocentrée à l'époque coloniale, l'approche formative et participative a complètement changé au cours des 80 années de travail des hydrologues de l'ORSTOM-IRD. Des scientifiques, des techniciens, des acteurs locaux, des professeurs, des étudiants, des stagiaires, des administrateurs, des observateurs, des villageois et d'autres personnes ont participé aux travaux scientifiques consacrés à l'observation, à la cartographie, à la surveillance, à l'analyse, à la compréhension ou à la modélisation des processus hydrologiques avec un large éventail de situations dans les régions de basse latitude et dans les pays en développement. En termes de personnel et de travail, c'est en fait à l'échelle locale que le personnel de l'ORSTOM-IRD *stricto sensu* est intervenu, y compris pour les études opérationnelles. Les travaux sur les grands bassins (Congo, Amazone) ont démarré tardivement, généralement avec une implication numérique moindre du personnel de l'ORSTOM-IRD et une large participation des partenaires locaux.

Ces contextes locaux, nationaux et internationaux ont soulevé de nombreuses questions scientifiques sur les processus spécifiques de l'hydrologie avec un niveau équivalent dans le monde entier, et le développement récent des différentes bases de données ouvertes, pour l'hydrologie et la climatologie, contribue à accroître les activités de recherche dans l'ensemble des régions tropicales, ainsi qu'à améliorer la qualité des études sur la zone critique, en particulier en Afrique.

Depuis près de 20 ans, l'ORSTOM-IRD encourage également les échanges entre partenaires de différentes régions du monde, par exemple entre l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique du Nord, voire l'Amérique du Sud. Des scientifiques éminents du Sud sont également invités à participer aux procédures d'évaluation des laboratoires en France. Certains événements scientifiques communs sont mentionnés dans l'article, mais il existe des dizaines de façons de partager des connaissances, des projets et des visions d'avenir. Parmi les événements les plus récents organisés au sein du réseau FRIEND-Water avec le soutien actif des chercheurs de l'IRD et leur financement, on peut citer plusieurs sessions de formation en Afrique et en Amérique du Sud sur l'utilisation des données satellitaires pour évaluer les hauteurs d'eau à des points non jaugés sur les fleuves, ou pour évaluer la turbidité de l'eau (Mahé *et al.* 2023), ainsi qu'une série de grands événements continentaux, conférences, ateliers et sessions de formation sur l'hydrologie des grands fleuves en Afrique, lancée en 2015 (Amoussou *et al.* 2021). L'IRD a fortement soutenu ces événements qui ont permis d'intensifier les échanges entre les communautés d'hydrologues de différentes régions d'Afrique.

### **Au delà de l'hydrologie quantitative.**

Bien que cet article se soit concentré sur l'hydrologie quantitative, d'autres aspects des recherches menées par les scientifiques de l'ORSTOM-IRD auraient mérité d'être décrits. L'érosion et le transport des sédiments ont été brièvement abordés dans la section 3, mais ils ne constituent qu'une facette d'un problème plus vaste, à savoir la qualité de l'eau et de l'environnement : contaminants émergents, plastiques et, plus récemment, réutilisation de l'eau. Au cours des vingt dernières années, un noyau actif de scientifiques de l'IRD s'est investi dans ce domaine, que ce soit en Afrique avec sa côte méditerranéenne (Hzami *et al.* 2021), en Amazonie (Moreira-Turcq *et al.* 2013), dans les Andes (Elbaz-Poulichet *et al.* 1999) ou en Asie du Sud-Est (Boithias *et al.* 2021), ce qui a souvent donné lieu à des collaborations avec le PHI de l'UNESCO et, plus récemment, avec l'Agence Française de Développement (AFD). Il s'agit sans aucun doute d'un sujet brûlant, car la qualité de l'eau se dégrade dans de nombreux pays en raison des activités anthropiques ; dans les régions où l'eau est rare en raison des conditions climatiques, cette dégradation de la qualité est un facteur de pression supplémentaire pour les populations locales et nécessite la mise en place de programmes de recherche ambitieux, de nature multidisciplinaire.

De tels programmes multidisciplinaires ont vu le jour à la fin des années 1970 à l'échelle locale (voir par exemple Chevallier *et al.* 1985) et ils sont trop nombreux pour être énumérés ici, mais l'une des premières caractéristiques de l'ORSTOM-IRD était sans aucun doute sa capacité à promouvoir et à mener à bien de telles initiatives. Avec l'émergence des questions liées au changement climatique mondial, des programmes internationaux multidisciplinaires ont été

lancés à l'échelle régionale, certains d'entre eux étant situés dans des régions tropicales, comme AMMA (Redesperger *et al.* 2006), dans lequel les scientifiques de l'ORSTOM-IRD ont été très actifs. Les approches systémiques et transdisciplinaires resteront certainement centrales à l'avenir pour relever les multiples défis liés au changement climatique mondial. L'eau est au cœur de bon nombre de ces défis, qu'il s'agisse d'un vecteur de pollution, d'un élément clé de la dynamique climatique régionale ou d'un élément essentiel à la vie sur Terre.

Cependant, de nombreuses questions liées aux processus hydrologiques restent sans réponse et nécessitent des recherches supplémentaires, en particulier pour les régions de basse latitude. Le réchauffement climatique affecte déjà les sociétés par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur, des sécheresses et des précipitations extrêmes, ainsi que par l'érosion côtière et la submersion dues à l'élévation du niveau de la mer. De plus, les activités humaines aggravent souvent les impacts du changement climatique sur les ressources en eau, la qualité de l'eau et l'environnement. Les incertitudes liées à l'observation et à la modélisation, les effets d'échelle (spatiale et temporelle), l'évaluation du bilan d'énergie et de l'évapotranspiration, la fonte et la sublimation de la neige ou de la glace en milieu montagneux, les écoulements souterrains, le transfert de matières solides et de contaminants, l'aménagement du territoire et les politiques et réglementations de gestion des ressources en eau sont parmi les questions clés qui nécessiteront une grande attention dans les années et décennies à venir. Dans ce contexte, il est particulièrement pertinent que le comité Afrique de l'IAHS ait lancé une vaste consultation afin d'identifier et de hiérarchiser les principaux défis auxquels l'Afrique est confrontée en matière d'hydrologie et de climat, en s'appuyant sur divers documents prospectifs tels que les 23 problèmes non résolus en hydrologie (Blöschl *et al.* 2019).

Même s'il reste beaucoup à faire en matière d'hydrologie tropicale, la contribution de l'ORSTOM-IRD au cours des dernières décennies a été significative à au moins trois égards :

- Premièrement, la quantité de données collectées est particulièrement impressionnante, notamment en Afrique ; beaucoup d'entre elles ont fait l'objet d'un contrôle qualité et ont été stockées selon des méthodes fiables et reproductibles, de sorte qu'elles sont aujourd'hui largement utilisées ou consultées par de nombreux utilisateurs sur le continent et au-delà.
- Deuxièmement, les hydrologues de l'ORSTOM-IRD ont participé de manière constante et active à des activités de formation dans des institutions universitaires ou opérationnelles, ce qui a contribué à l'émergence d'une communauté d'un niveau universitaire élevé, ainsi qu'à une amélioration de l'expertise technique des services nationaux et régionaux de météorologie et d'hydrologie.
- Troisièmement, les connaissances produites couvrent une large gamme de sujets et ont démontré leur grande utilité pour des applications opérationnelles dans divers domaines concernant l'exploitation de l'eau, comme les barrages, l'évaluation et la prévision des fortes crues, ou les questions socio-économiques et de santé.

## Précisions et remerciements

Cet article a été rédigé par cinq hydrologues de l'IRD. Ils ont reçu une aide considérable d'un sixième chercheur, Thierry Lebel, et ont bénéficié des encouragements et des suggestions de deux de leurs aînés, Bernard Pouyaud et Jacques Claude. Nous voulons exprimer notre sincère gratitude à tous les trois.

Toutefois, compte-tenu de leurs spécialités, de leurs intérêts et de leur travail personnel, les cinq co-auteurs ne peuvent présenter qu'une vue vraisemblablement biaisée d'une histoire scientifique qui s'est déroulée dans une période turbulente. Le texte aurait été sans aucun doute écrit différemment par d'autres. Bien-sûr, la même histoire racontée par nos partenaires du sud, dont nous avons été très proches, aurait été fascinante en présentant un angle totalement différent.

De plus, les auteurs sont très reconnaissants pour les commentaires, critiques et suggestions des deux réviseurs, Vic Baker et Edgardo M. Latrubesse, comme des fructueux échanges avec John



Diemer. Tous les trois ont contribué à la forme finale de l'article. Les co-auteurs remercient également Keith Beven pour sa relecture et ses corrections de la première version, ainsi que pour ses amicales suggestions.

Finalement, ils voudraient rendre un hommage collectif à tous les observateurs, opérateurs, techniciens, ingénieurs, personnels administratifs et chercheurs de l'ORSTOM-IRD, comme aux nombreux partenaires institutionnels du Sud et du Nord, que leur nom apparaisse ou non.

Nous avons une pensée spéciale pour les disparus.

## Références

- Académie des Sciences (editor). 2006. *Sciences et Pays en Développement - Afrique Subsaharienne Francophone*. Les Ulis (France): UDP Science, 365 p.
- Al Ali, Y., Touma, J., Zante, P., Nasri, S., and Albergel, J. 2008. Water and sediment balances of a contour bench terracing system in a semi-arid cultivated zone (El Gouazine, central Tunisia). *Hydrological Sciences Journal*, 53(4): 883–892. Doi: 10.1623/hysj.53.4.883
- Albergel, J., Nasri, S., Boufaroua, M., Droubi, A., and Merzouk, A. A. 2004. Petits barrages et lacs collinaires, aménagements originaux de conservation des eaux et de protection des infrastructures aval : exemples des petits barrages en Afrique du Nord et au Proche-Orient. *Sécheresse : Science et Changements Planétaires*, 15(1): 78–86.
- AMMA-CATCH 2005. *Surface flux dataset (including meteorological data, radiative budget, surface energy, water vapor and carbon fluxes), within the Donga watershed (600 km<sup>2</sup>)*. Doi: 10.17178/AMMA-CATCH.AE.H2OFlux\_Odc.
- Amani, A., and Paturel, J. E. 2017. Le projet de révision des normes hydrologiques en Afrique de l'Ouest et Afrique Centrale. *La Météorologie* 2017: 6–7
- Amoussou, E., Mahé, G., Amrouni, O., Bodian, A., Cudennec, C., Dietrich, S., Kodja, D. J., and Vissin, W. E. (editors). 2021. *Hydrology of Large River Basins of Africa*. PIAHS 384.
- Autin, P., Sicart, J. E., Rabatel, A., Soruco, A., and Hock, R. 2022. Climate controls on the interseasonal and interannual variability of the surface mass and energy balances of a tropical glacier (Zongo Glacier, Bolivia, 16°S): New insights from the multi-year application of a distributed energy balance model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 127: e2021JD035410. Doi: 10.1029/2021JD035410.
- Avissar, R., Silva Dias, P. L., Silva Dias, M. A. F., and Nobre, C. 2002. The Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA): Insights and future research needs. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 107 (D20): LBA 54-1-LBA 54-6. Doi: 10.1029/2002JD002704
- Avissar, R., and Nobre, C. A. 2002. Preface to special issue on the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA). *Journal of Geophysical Research* 107: 8034. Doi: 10.1029/2002JD002507.
- Azam, M. F., Ramanathan, A., Wagnon, P., Vincent, C., Linda, A., Berthier, E., Sharma, P., Mandal, A., Angchuk, T., Singh, V. B., and Pottakkal, J. G. 2016. Meteorological conditions, seasonal and annual mass balances of Chhota Shigri Glacier, western Himalaya, India. *Annals of Glaciology* 57(71): 328–338. Doi: 10.3189/2016AoG71A570.
- Bariac, T., Millet, A., Ladouche, B., Mathieu, R., Grimaldi, C., Grimaldi, M., Hubert, P., Mollicova, H., Bruckler, L., Bertuzzi, P., Boulegue, J., Brunet, Y., Tournebise, R., and Granier, A. 1995. Stream hydrograph separation on two small Guianese catchments. In: *International Symposium on Tracer Technologies for Hydrological Systems*, edited by C. Leibundgut, 193–209. Wallingford: IAHS.
- Bassel, M. 1995. *Eaux et environnement à Dakar : pluies, ruissellement, pollution et évacuation des eaux : contribution à l'étude des problèmes d'environnement liés aux eaux dans la région de Dakar*. Thèse 3e cycle. Université Cheick Anta Diop, Dakar. 244 p.
- Blöschl, G., Bierkens, M. F. P., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., Kirchner, J. W., McDonnell, J. J., Savenije, H. H. G., Sivapalan, M., Stump, C., Toth, E., Volpi, E., Carr, G., Lupton, C., Salinas, J., Széles, B., Viglione, A., Aksoy, H., Allen, S. T., Amin, A., Andréassian, V., Arheimer, B., Aryal, S. K., Baker, V., Bardsley, E., Barendrecht, M. H., Bartosova, A., Batelaan, O., Berghuijs, W. R., Beven, K., Blume, T., Bogaard, T., Borges de Amorim, P., Böttcher, M. E., Boulet, G., Breinl, K., Brilly, M., Brocca, L., Buytaert, W., Castellarin, A., Castelletti, A., Chen, X., Chen, Y., Chen, Y., Chiffard, P., Claps, P., Clark, M. P., Collins, A. L., Croke, B., Dathe, A., David, P. C., de Barros, F. P. J., de Rooij, G., Di Baldassarre, G., Driscoll, J. M., Duethmann, D., Dwivedi, R., Eris, E., Farmer, W. H., Feicabrino, J., Ferguson, G., Ferrari, E., Ferraris, S., Fersch, B., Finger, D., Foglia, L., Fowler, K., Gartsman, B., Gascoin, S., Gaume, E., Gelfan, A., Geris, J., Gharari, S., Gleeson, T., Glendell, M., Gonzalez Bevacqua, A., González-Dugo, M. P., Grimaldi, S., Gupta, A. B., Guse, B., Han, D., Hannah, D., Harpold, A., Haun, S., Heal, K., Helfricht, K., Hernegger, M., Hipsey, M., Hlaváčiková, H., Hohmann, C., Holko, L., Hopkinson, C., Hrachowitz, M., Illangasekare, T. H., Inam, A., Innocente, C., Istanbuluoglu, E., Jarihani, B., Kalantari, Z., Kalvans, A., Khanal, S., Khatami, S., Kiesel, J., Kirkby, M., Knoben, W., Kochanek, K., Kohnová, S., Kolehina, A., Krause, S., Kremer, D., Kreibich, H., Kunstmann, H., Lange, H., Liberato, M. L. R., Lindquist, E., Link, T., Liu, J., Loucks, D. P., Luce, C., Mahé, G., Makarieva, O., Malard, J., Mashtayeva, S., Maskey, S., Mas-Pla, J., Mavrova-Guirguinova, M., Mazzoleni, M., Memild, S., Mestear, B. D., Montanari, A., Müller-Thomy, H., Nabizadeh, A., Nardi, F., Neale, C., Nesterova, N., Nurtaev, B.,

- Odongo, V. O., Panda, S., Pande, S., Pang, Z., Papacharalampous, G., Perrin, C., Pfister, L., Pimentel, R., Polo, M. J., Post, D., Prieto Sierra, C., Ramos, M.-H., Renner, M., Reynolds, J. E., Ridolfi, E., Rigon, R., Riva, M., Robertson, D. E., Rosso, R., Roy, T., Sá, J. H. M., Salvadori, G., Sandells, M., Schaeffli, B., Schumann, A., Scolobig, A., Seibert, J., Servat, E., Shafiei, M., Sharma, A., Sidibe, M., Sidle, R.C., Skaugen, T., Smith, H., Spiessl, S. M., Stein, L., Steinsland, I., Strasser, U., Su, B., Szolgay, J., Tarboton, D., Tauro, F., Thirel, G., Tian, F., Tong, R., Tussupova, K., Tyralis, H., Uijlenhoet, R., van Beek, R., van der Ent, R. J., van der Ploeg, M., Van Loon, A. F., van Meerveld, I., van Nooijen, R., van Oel, P.R., Vidal, J.-P., von Freyberg, J., Vorogushyn, S., Wachniew, P., Wade, A. J., Ward, P., Westerberg, I. K., White, C., Wood, E. F., Woods, R., Xu, Z., Yilmaz, K. K., and Zhang, Y. 2019. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal* 64(10): 1141–1158. Doi: 10.1080/02626667.1620507.
- Bogning, S., Frappart, F., Paris, A., Blarel, F., Nino, F., Saux Picart, S., Lanert, P., Seyler, F., Mahe, G., Onguene, R., Bricquet, J. P., Etame, J., Paiz, M. C. and Braun, J. J. 2021. Hydro-climatology of the Ogooué River basin coupling hydrological modeling and satellite altimetry. *Advances In Space Research*, 2, 0273-1177, Doi: 10.1016/J.Asr.2020.03.045
- Boithias, L., Auda, Y., Audry, S., Bricquet, J. P., Chanhphengxay, A., Chaplot, V., de Rouw, A., Henry des Tureaux, T., Huon, S., Janeau, J. L., Latsachack, K., Le Troquer, Y., Lestrelin, G., Maeght, J. L., Marchand, P., Moreau, P., Noble, A., Pando-Bahuon, A., Phachomphon, K., Phanthavong, K., Pierret, A., Ribolzi, O., Riotte, J., Robain, H., Rochelle-Newall, E., Sayavong, S., Sengtaheuanghoung, O., Silvera, N., Sipaseuth, N., Soulleuth, B., Souliyavongsa, X., Sounyaphong, P., Tasaketh, S., Thammahacksa, C., Thiebaut, J. P., Valentin, C., Vigiak, O., Viguier, M., and Xayyathip, K. 2021. The multiscale TROPICAL CatchmentS critical zone observatory M-TROPICS dataset II: Land use, hydrology and sediment production monitoring in Houay Pano, northern Lao PDR. *Hydrological Processes* 35(5), e14126. <https://doi.org/10.1002/hyp.14126>
- Bonneuil, C. 1991. *Des savants pour l'Empire - La structuration des recherches scientifiques coloniales au temps de la mise en valeur des colonies françaises (1917-1945)*. Paris: ORSTOM.
- Bouvier, C., and Desbordes, M. 1990. Un modèle de ruissellement pour les villes de l'Afrique de l'Ouest. *Hydrologie Continentale* 5(2): 77–86.
- Bouvier, C., Chahinian, N., Adamovic, M., Cassé, C., Crespy, A., Crès, A., and Alcoba, M. 2017. Large-scale GIS-based urban flood modelling: A case study in the city of Ougadougou. Presented at the *SimHydro2017*, Sophia-Antipolis, France.
- Boyer, J. F., Dieulin, C., Rouché, N., Crès, A., Servat, E., Paturel, J. E., and Mahé, G. 2006. SIEREM an environmental information system for water resources. In: *Climate Variability and Change - Hydrological Impacts - 5th FRIEND World Conference*, edited by S. Demuth, A. Gustard, E. Planos, F. Scatena and E. Servat. La Habana, Cuba. IAHS: 308, 44
- Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Käb, A., and Treichler, D. 2017. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. *Nature Geoscience* 10: 668–673. Doi: 10.1038/s41561-018-0171-z.
- Caballero, Y., Chevallier, P., Gallaire, R., and Pillco, R. 2004. Flow modelling in a high mountain valley equipped with hydropower plants: Rio Zongo Valley - Cordillera Real - Bolivia. *Hydrological Processes* 18: 939–957. Doi: 10.1002/hyp.1339.
- Cadier, E. 1993. *Hydrologie des petits bassins du Nordeste brésilien semi-aride - Transposition à des bassins non étudiés*. Thèse. Université Montpellier II.
- Callède, J., Hiez, G., Jacon, G. 1985. *Recherches hydrologiques en Amazonie brésilienne*. Paris, ORSTOM.
- Camus, H., Chaperon, P., Girard, G., and Molinier, M. 1976. *Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture. Côte d'Ivoire, Korhogo, 1962-1972*. Paris: ORSTOM.
- Casenave, A., and Valentin, C. 1992. A runoff capability classification based on surface features criteria in semi-arid areas of West-Africa. *Journal of Hydrology* 130: 231–249. Doi: 10.1016/0022-1694(92)90112-9
- Castro, N. M. dos R., Auzet, A. V., Chevallier, P., and Leprun, J. C. 1999. Land use change effects on runoff and erosion from plot to catchment scale on the basaltic plateau of Southern Brazil. *Hydrological Processes* 13: 1621–1628. Doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19990815)
- Chagnaud, G., Panthou, G., Vischel, T., and Lebel, T. 2022. A synthetic view of rainfall intensification in the West African Sahel. *Environmental Research Letters* 17(4): 044005. Doi: 10.1088/1748-9326/ac4a9c.
- Chahinian, N., Alcoba, M., Dembélé, N. J., Cazenave, F., and Bouvier, C. 2023. Evaluation of an early flood warning system in Bamako (Mali): Lessons learned from the flood of May 2019. *Journal of Flood Risk Management*, 16(3). Doi: 10.1111/jfr3.12878.
- Chevallier, P., and Pouyaud, B. (editors). 1995. *L'hydrologie tropicale: Géoscience et outil pour le développement / Tropical Hydrology: a Geoscience and a Tool for Sustainability*. Wallingford (UK): IAHS - ORSTOM.
- Chevallier, P., Claude, J., Pouyaud, B., and Bernard, A. 1985. *Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la Mare d'Oursi - Burkina Faso*. Paris: ORSTOM.
- Chocat, B. 1978. *Un modèle de simulation des écoulements dans les réseaux d'assainissement pluvial*. Thèse de Docteur-Ingénieur. INSA, Lyon.
- Claude, J., and Chartier, R. 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie. Campagne 1975. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie* XIV(1): 3–35,

- Cochonneau, G., Sondag, F., Guyot, J.-L., Geraldo, B., Filizola, N., Fraizy, P., Laraque, A., Magat, P., Martinez, J.-M., Noriega, L., Oliveira, E., Ordonez, J., Pombosa, R., Seyler, F., Sidgwick, J., and Vauchel, P. 2006. The environmental observation and research project, ORE HYBAM and the rivers of the Amazon basin. In: *Climate Variability and Change - Hydrological Impacts - 5th FRIEND World Conference*, edited by S. Demuth, A. Gustard, E. Planos, F. Scatena and E. Servat. La Habana, Cuba. IAHS, 308: 44+.
- Desbordes, M. 1974. *Réflexions sur les méthodes de calcul des réseaux urbains d'assainissement*. Thèse Docteur-Ingénieur. Un. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.
- Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., Olivry, J.C., Albergel, J., Amogu, O., Cappelaere, B., Dessouassi, R., Diedhiou, A., Le Breton, E., Mamadou, I., and Sighomnou, D. 2009. Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis. *Journal of Hydrology* 375(1-2): 90–102. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.12.012.
- Diémé, L. P., Bouvier, C., Bodian, A., and Sidibé, A. 2022. Construction de la topologie de drainage à fine résolution spatiale en milieu urbain: exemple de l'agglomération de Dakar (Sénégal). *LHB-Hydroscience Journal* 108 (1) : 2061313. Doi:10.1080/27678490.2022.2061313
- Dieulin, C., Mahe, G., Paturel, J. E., Ejiyar, S., Trambly, Y., Rouche, N., and El Mansouri, B. 2019. A new 60-year 1940–1999 monthly gridded rainfall data set for Africa. *Water* 11(2) : 387; <https://doi.org/10.3390/W11020387>
- Dubreuil, P. 1960. *Expertise sur documents du débit régularisable par le réservoir de Sobradinho sur le rio Sao Francisco*. ORSTOM Brésil, CHESF, 10 p.
- Dubreuil, P. 1962. *Groupe d'études de la vallée de Jaguaribe : proposition pour un programme d'études hydrologiques 1963-64*. ORSTOM, Paris, 21 p.
- Dubreuil, P. 1966. L'étude pluvio-hydrologique du bassin du Jaguaribe. *Terres et Eaux*, XIX(47): 22–31.
- Dubreuil, P. 1985. Review of field observations of runoff generation in the tropics. *Journal of Hydrology* 80(3-4): 237–264. Doi: 10.1016/0022-1694(85)90119-2.
- Dubreuil, P. 1986. Review of relationships between geophysical factors and hydrological characteristics in the tropics. *Journal of Hydrology* 87: 201–222. Doi: 10.1016/0022-1694(86)90014-4.
- Dubreuil, P. 2003. *La science hydrologique. Du service des colonies à l'aide au développement*. Paris: L'Harmattan.
- Eagleson, P. S. 1978. Climate, soil and vegetation, 6, Dynamics of the annual water balance, *Water Resource Research* 35(14). Doi: 10.1029/WR014i005p00749.
- Eagleson, P. S. 1986. The emergence of global-scale hydrology. *Water Resource Research* 22(9S): 6S-14S. Doi: 10.1029/WR022i09Sp0006S
- Eagleson, P. S. 1991. Global change, a catalyst for the development of hydrologic science. *Bulletin of the American Meteorological Society* 72(1). Doi:10.1175/1520-0477(1991)072<0034:GCACFT>2.0.CO;2.
- Elbaz-Poulichet, F., Seyler, P., Maurice-Bourgoin, L., Guyot, J.-L., and Dupuy, C. 1999. Trace element geochemistry in the upper Amazon drainage basin (Bolivia). *Chemical Geology* 157: 319–334.
- Emery, C. M., Paris, A., Biancamaria, S., Boone, A., Calmant, S., Garambois, P.-A., Silva, J. S. D., and David, C. H. 2022. Discharge estimation via assimilation of multisatellite-based discharge products: Case study over the Amazon Basin. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 19: 1–5. Doi: 10.1109/LGRS.2020.3020285.
- Ezzaouini, M., Mahe, G., Kacimi, I., and Zerouali, A. 2020. Comparison of the Musle Model and two years of solid transport measurement in the Bouregreg Basin, and impact on the sedimentation in the Sidi Mohamed Ben Abdellah Dam, Morocco. *Water* 12(7): 1882. <https://doi.org/10.3390/W12071882>
- Favreau, G., Cappelaere, B., Massuel, S., Leblanc, M., Boucher, M., Boulain, N., and Leduc, C. 2009. Land clearing, climate variability and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review. *Water Resources Research* 45 (7). Doi: 10.1029/2007WR006785
- Fritsch, J. M. 1992. *Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECEREX en Guyane française*. Thèse, Un. Montpellier II. Paris: ORSTOM.
- Galle, S., Grippa, M., Peugeot, C., Moussa, I. B., Cappelaere, B., Demarty, J., Mougin, E., Panthou, G., Adjomayi, P., Agbossou, E. K., Ba, A., Boucher, M., Cohard, J.-M., Descloitres, M., Descroix, L., Diawara, M., Dossou, M., Favreau, G., Gangneron, F., Gosset, M., Hector, B., Hiernaux, P., Issoufou, B.-A., Kergoat, L., Lawin, E., Lebel, T., Legchenko, A., Abdou, M. M., Malam-Issa, O., Mamadou, O., Nazoumou, Y., Pellarin, T., Quantin, G., Sambou, B., Seghier, J., Seguis, L., Vandervaere, J.-P., Vischel, T., Vouillamoz, J.-M., Zannou, A., Afouda, S., Alhassane, A., Arjounin, M., Barral, H., Biron, R., Cazenave, F., Chaffard, V., Chazarin, J.-P., Guyard, H., Kone, A., Mainassara, I., Mamane, A., Oi, M., Ouani, T., Soumaguel, N., Wubda, M., Ago, E. E., Alle, I. C., Allies, A., Arpin-Pont, F., Awessou, B., Charvet, G., Casse, C., Dardel, C., Depeyre, A., Diallo, F. B., Do, T., Fatras, C., Frappart, F., Gal, L., Gascon, T., Gibon, F., Guirou, I., Ingatan, A., Kempf, J., Kotchoni, D. O., Lawson, F. M. A., Leauthaud, C., Louvet, S., Mason, E., Nguyen, C. C., Perrimond, B., Pierre, C., Richard, A., Robert, E., Roman-Cascon, C., Velluet, C., and Wilcox, C. 2018. AMMA-CATCH, a Critical Zone Observatory in West Africa monitoring a region in transition. *Vadose Zone Journal* 17(1): 180062. Doi: 10.2136/vzj2018.03.0062
- Gbetkom P.-G., Crétaux J.-F., Tchilibou M., Carret A., Delhoume M., Bergé-Nguyen M., and Sylvestre F. 2022. Lake Chad vegetation cover and surface water variations in response to rainfall fluctuations in Lake Chad watershed under recent climate conditions (2000–2020). *Science of the Total Environment* 857: 1–12

- Girard, G., Chaperon, P., Ledoux, E., and Villeneuve, J. P. 1981. Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie* XVIII(4): 195–280.
- Gleizes, M. 1985. *Un regard sur l'ORSTOM. 1943-1983*. Paris: ORSTOM.
- Goutorbe, J.-P., Lebel, T., Tinga, A., Bessemoulin, P., Brouwer, J., Dolman, A. J., Engman, E. T., Gash, J. H. C., Hoepffner, M., Kabat, P., Kerr, Y. H., Monteny, B., Prince, S., Said, F., Sellers, P. and Wallace, J. S. 1994. HAPEX-Sahel: A large-scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Annales Geophysicae* 12(1): 53–64. Doi: 10.1007/s00585-994-0053-0.
- Giertz, S., and Diekkrüger, B. 2003. Analysis of the hydrological processes in a small headwater catchment in Benin (West Africa). *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C* 28(33): 1333–1341. Doi: 10.1016/j.pce.09.009.
- Guyot, J.L. 2008. *Contrôles géodynamique, hydrologique et biogéochimique de l'érosion/altération et des transferts de matière dans le bassin de l'Amazonie : impact des variations hydroclimatiques et des activités anthropiques*. IRD, Lima, 25 p.
- Hadour, A., Meddi, M., and Mahé, G. 2021. Climatic and anthropogenic impacts on the decrease of sediment discharge to the Mediterranean coast from the largest river of Maghreb. *International Journal of Sediment Research* 36(2): 268–278. Doi: 10.1016/j.ijsrc.2020.07.001
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahe, G., Toumi, S., and Ali Rahamni, S. E. 2018. Erosion, sedimentation and climate change on the Wadi Mina at the Sidi M'hamed Ben Aouda Dam, Algeria. *Water* 10(7): 895; <https://doi.org/10.3390/W10070895>
- Herbaud, J. 1966a. *Etude du ruissellement en zone urbaine à Brazzaville : le bassin de Makélékélé*. Paris: ORSTOM.
- Herbaud, J. 1966b. *Etude du ruissellement en zone urbaine à Niamey : les bassins versants du Gounti-Yena*. Paris: ORSTOM.
- Herzog, A., Hector, B., Cohard, J.-M., Vouillamoz, J.-M., Lawson, F. M. A., Peugeot, C. and de Graaf, I. 2021. A parametric sensitivity analysis for prioritizing regolith knowledge needs for modeling water transfers in the West African critical zone. *Vadose Zone Journal* e20163. Doi: 10.1002/vzj2.20163
- Horton, R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. AGU* 14: 446–460.
- Hougard, J.-M., Alley, E. S., Yaméogo, L., Dadzie, K. Y., and Boatin, B. A. 2001. Eliminating Onchocerciasis after 14 years of vector control: A proved strategy. *The Journal of Infectious Diseases* 184(4): 497–503. Doi: 10.1086/322789.
- Hours, B. 2020. *De l'ORSTOM à l'IRD, de la colonie à l'agenda global*. Paris : L'Harmattan Eds.
- Hyperbav 1990. *Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide*. Paris: ORSTOM.
- Hzami, A., Heggy, E., Amrouni, O., Mahé, G., Maanan, M., and Abdeljaouad, S. 2021. Alarming coastal vulnerability of the deltaic and sandy beaches of North Africa. *Nature Scientific Reports* 11: 2320. Doi: 10.1038/s41598-020-77926-x.
- Jaccon, G. 1987. Jaugeage de l'Amazonie à Obidos par les méthodes du bateau mobile et des grands fleuves. *Hydrologie Continentale* 2(2): 117–126.
- Kirkby, M. J. 1988. Hillslope runoff processes and models. *Journal of Hydrology* 100: 315–339. Doi: 10.1016/0022-1694(88)90190-4.
- Koster, R. D., Dirmeyer, P. A., Guo, Z., Bonan, G., Chan, E., Cox, P., Gordon, C. T., Kanae, S., Kowalczyk, E., Lawrence, D., Liu, P., Lu, C.-H., Malyshev, S., McAvaney, B., Mitchell, K., Mocko, D., Oki, T., Oleson, K., Pitman, A., Sud, Y. C., Taylor, C. M., Verseghy, D., Vasic, R., Xue, Y., and Yamada, T. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science* 305 (5687): 1138–1140. Doi: 10.1126/science.1100217.
- Kosuth, P., Calde, J., Laraque, A., Filizola, N., Guyot, J. L., Seyler, P., Fritsch, J. M., and Guimaraes, V. 2009. Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. *Hydrological Processes* 23(22): 3141–3150. Doi: 10.1002/hyp.7387.
- Kotti, F., Dezileau, L., Mahé, G., Habaieb, H., Benabdallah, S., Bentkaya, M., Calvez, R., and Dieulin, C. 2017. The impact of dams and climate on the evolution of the sediment loads to the sea by the Medjerda River using a paleo-hydrological approach. *Journal of African Earth Sciences* 142: 226–233. doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.10.003
- Laraque, A., Bricquet, J. P., Pandi, A., and Olivry, J. C. 2009. A review of material transport by the Congo River and its tributaries, *Hydrological Processes* 23: 3216–3224. Doi: 10.1002/hyp.7395.
- Lebel, T. 1997. *Variabilité des pluies au Sahel : observation, estimation et modélisation*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Institut Polytechnique de Grenoble, 145 p.
- Lebel, T., Cappelaere, B., Galle, S., Hanan, N., Kergoat, L., Levis, S., Vieux, B., Descroix, L., Gosset, M., Mougin, E., Peugeot, C., and Seguis, L. 2009. AMMA-CATCH studies in the Sahelian region of West-Africa: An overview. *Journal of Hydrology* 375 (1): 3–13. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.03.020
- Lebel, T., Parker, D. J., Flamant, C., Bourlès, B., Marticorena, B., Mougin, E., Peugeot, C., Diedhiou, A., Haywood, J. M., Ngamini, J. B., Polcher, J., Redelsperger, J.-L. and Thorncroft, C. D. 2010. The AMMA field campaigns: Multiscale and multidisciplinary observations in the West African region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 136 (S1): 8–33. Doi: 10.1002/qj.486.

- Lebel, T., Sauvageot, H., Hoepffner, M., Desbois, Guillot, B., and Hubert, P. 1992. Rainfall estimation in the Sahel: The EPSAT-NIGER experiment. *Hydrological Sciences Journal* 37(3): 201–215. Doi: 10.1080/02626669209492582.
- Leduc, C., Favreau, G., and Schroeter, P. 2001. Long-term rise in a Sahelian water-table: The continental terminal in south-west Niger. *Journal of Hydrology* 243: 43–54. Doi: 10.1016/S0022-1694(00)00403-0.
- Liéno, G., Mahé, G., Olivry, J. C., Naah, E., Servat, E., Sigha Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Ndam Ngoupayou, J., Ecodeck, G. E., and Paturel, J. E. 2005. Régime des flux de matières solides en suspension au Cameroun: revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes; diversité climatique et actions anthropiques. *Hydrological Sciences Journal* 50(1): 111–124.
- Liéno, G., Mahé, G., Paturel, J. E., Servat, E., Sighomnou, D., Ecodeck, G. E., Dezetter, A., and Dieulin, C. 2008. Changements des régimes hydrologiques en région équatoriale camerounaise: un impact du changement climatique en Afrique équatoriale ? *Hydrological Sciences Journal* 53(4): 789–801.
- Litt, M., Sicart, J. E., Helgason, W. D., and Wagnon, P. 2015. Turbulence characteristics in the atmospheric surface layer for different wind regimes over the tropical Zongo Glacier (Bolivia, 16 degrees S). *Boundary-Layer Meteorology* 154: 471–495. Doi: 10.1007/s10546-014-9975-6.
- Mahamat Nour, A., Vallet-Coulomb, C., Gonçalves, J., Sylvestre, F., and Deschamps, P. 2021. Rainfall-discharge relationship and water balance over the past 60 years within the Chari-Logone sub-basins, Lake Chad basin. *Journal of Hydrology. Regional Studies* 35: 100824. Doi: 10.1016/j.ejrh..100824.
- Mahé, G., Olivry, J. C., and Servat, E. 2005. Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : extrêmes et paradoxes. *AISH Publ.* 296, 169–177.
- Mahé, G., Rouché, N., Dieulin, C., Ejjiyar, S., Boyer, J. F., Ibrahim, B., Crès, A., Servat, E., El Mansouri, B., Valton, C., and Paturel, J. E. 2012. *Cartes des pluies annuelles en Afrique / Annual rainfall map of Africa*. IRD, HydroSciences.
- Mahé, G., Liéno, G., Descroix, L., Bamba, F., Paturel, J. E., Laraque, A., Meddi, M., Habaieb, H., Adeaga, O., Dieulin, C., Chahnez Kotti, F., and Khomsi, K. 2013. The rivers of Africa: Witness of climate change and human impact on the environment. *Hydrological Processes* 27 (15): 2105–2114. Doi: 10.1002/hyp.9813.
- Mahé, G., Abdo, G., Amoussou, E., Brou, T., Dietrich, S., El Tayeb, A., van Lanen, H., Meddi, M., Mishra, A., Orange, D., Quynh Le, T. P., Tshimanga, R., Valimba, P., Yopez, S., Ogilvie, A., and Amrouni, O. 2021. The UNESCO FRIEND-Water program: Accelerates, shares and transfers knowledge and innovation in hydrology across the world in the frame of the Intergovernmental Hydrological Program (IHP). *Proc. IAHS* 384: 5–18.
- Mahé G., Mishra, A., and Verbist, K. 2023. *FRIEND-Water A Global Perspective, 2014-2022, Facts and Figures*. Paris: UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384838>.
- Mangiarotti, S., Martinez, J.-M., Bonnet, M.-P., Buarque, D. C., Filizola, N., and Mazzega, P. 2013. Discharge and suspended sediment flux estimated along the mainstream of the Amazon and the Madeira Rivers (from in situ and MODIS Satellite Data). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21: 341–355. Doi: 10.1016/j.jag.2012.07.015.
- Marieu, B., Bamba, F., Bricquet, J. P., Cissé, N., Gréard, M., Henry Des Tureaux, T., Mahé, G., Mahieux, A., Olivry, J. C., Orange, D., Picouet, C., Sidibé, M., and Touré, M. 1998. *Actualisation des données hydrométriques du fleuve Niger au Mali pour EQUANIS*. Rapport final EQUANIS. Programme PEGI/GBF/EQUANIS, ORSTOM/LECOM-CNRST-DNHE, Bamako, Mali, 82 p.
- Miller, J. D., Vischel, T., Fowe, T., Panthou, G., Wilcox, C., Taylor, C. M., Visman, E., Coulibaly, G., Gonzalez, P., Body, R., Vesuviano, G., Bouvier, C., Chahinian, N., Cazenave, F. 2022. A modelling-chain linking climate science and decision-makers for future urban flood management in West Africa. *Regional Environmental Change*. 22(3): 93. Doi: 10.1007/s10113-022-01943
- Mimeau, L., Esteves, M., Zin, I., Jacobi, H.-W., Brun, F., Wagnon, P., Koirala, D., and Arnaud, Y. 2019. Quantification of different flow components in a high-altitude glacierized catchment (Dudh Koshi, Himalaya): Some cryospheric-related issues. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(9): 3969–3996. Doi: 10.5194/hess-23-3969-2019.
- Molinier, M. 1979. Note sur les débits et la qualité des eaux du Congo à Brazzaville. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie* 16: 55–66.
- Molinier, M., Guyot, J.-L., Callède, J., de Oliveira, E., Guimarães, V., Cudo, K. J., and de Aquino, M. 1993. Hidrologia de la cuenca amazónica brasileira: HIBAM. Primeros resultados sobre la cuenca del Rio Madeira, 155–164. In: *Seminario sobre el PHICAB*, edited by M. A. Roche, J. Bourges, E. Salas and C. Diaz. La Paz, nov. 1992.
- Moquet, J.-S., Guyot, J.-L., Crave, A., Viers, J., Filizola, N., Martinez, J.-M., Oliveira, T. C., Sánchez, L. S. H., Lagane, C., Casimiro, W. S. L., Noriega, L. and Pombosa, R. 2016. Amazon River dissolved load: Temporal dynamics and annual budget from the Andes to the ocean. *Environmental Science and Pollution Research* 23 (12): 11405–11429. Doi: 10.1007/s11356-015-5503-6.
- Mougin, E., Hiernaux, P., Kergoat, L., Grippa, M., de Rosnay, P., Timouk, F., Le Dantec, V., Demarez, V., Lavenue, F., Arjounin, M., Lebel, T., Soumaguel, N., Ceschia, E., Mougenot, B., Baup, F., Frappart, F., Frison, P. L., Gardelle, J., Gruhier, C., Jarlan, L., Mangiarotti, S., Sanou, B., Tracol, Y., Guichard, F., Trichon, V., Diarra, L., Soumaré, A., Koité, M., Dembélé, F., Lloyd, C., Hanan, N. P., Damesin, C., Delon, C., Serça, D., Galy-Lacaux, C., Seghier, J., Becerra, S., Dia, H., Gangneron, F., and Mazzega, P. 2009. The AMMA-CATCH Gourma observatory site in Mali: Relating climatic variations to changes in vegetation, surface hydrology, fluxes and natural resources. *Journal of Hydrology* 375 (1): 14–33. Doi: 10.1016/j.jhydrol.06.045.

- Moreira-Turcq, P., Bonnet, M. P., Amorim, M., Bernardes, M., Lagane, C., Maurice, L., Perez, M., and Seyler, P. 2013. Seasonal variability in concentration, composition, age, and fluxes of particulate organic carbon exchanged between the floodplain and Amazon River. *Global Biogeochemical Cycles* 27: 119–130.
- Nasri, S., Albergel, J., Cudennec, C., and Berndtsson, R. 2004. Hydrological processes in macrocatchment water harvesting in the arid region of Tunisia: The traditional system of tabias. *Hydrological Science Journal* 49 (2): 261–272. Doi: 10.1623/hysj.49.2.261.34838.
- Nouvelot, J. F. 1993. *Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux, en Afrique tropicale et équatoriale*. Montpellier: CIEH, ORSTOM.
- Olivry J.C. 1989. *Présentation du programme de mesure de flux particuliers et dissous sur les grands bassins fluviaux équatoriaux péri-atlantiques (Programme PIRAT, Opération Grands Bassins Fluviaux)*. In: *Quatrièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier : physico-chimie des eaux continentales*. Paris (FRA): ORSTOM, 125–130, Colloques et Séminaires, ISBN 2-7099-0961-8
- Olivry, J. C., and Sircoulon, J. 1998. Evolution des recherches hydrologiques en partenariat en Afrique subsaharienne : l'exemple des pays francophones. *Revue des Sciences de l'Eau* n° spécial, 61–75.
- Panthou G., Vischel, T., and Lebel, T. 2014. Recent trends in the regime of extreme rainfall in the West African Sahel. *International Journal of Climatology* 34.15: 3998–4006. 10.1002/joc.3984.
- Paturel, J. E., Mahé, G., Diello, P., Barbier, B., Dezetter, A., Karambiri, A., Yacouba, H., Maiga, H., and Dieulin, C. 2017. Using land cover changes and demographic data to improve hydrological modelling in Sahel. *Hydrological Processes* 31 (4): 811–824. Doi: 10.1002/hyp.11057.
- Paturel, J. E., Ouedraogo, M., Servat, E., Mahé, G., Dezetter, A. and Boyer, J. F. 2003. The concept of rainfall and streamflow normals in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological Sciences Journal* 48(1): 125–137. Doi: 10.1623/hysj.48.1.125.43479.
- Paturel J.-E., Kouacou B., Lohou F., Pons F., Dje K., Coulibaly N., Karambiri H., Borrell-Estupina V., Ogilvie A., Servat E. Data rescue and valorization of old climatological data – application to rainfall data in Burkina Faso and Ivory Coast using NUNIEAU software, in Variability and change across space, time, extremes and interfaces, IAHS 2022, Montpellier, France, 29 May 03 June 2022, <https://doi.org/10.5194/piahs-385-219-2024>
- Peugeot, C., Guichard, F., Bock, O., Bouniol, D., Chong, M., Boone, A., Cappelaere, B., Gosset, M., Besson, L., Lemaître, Y., Séguis, L., Zannou, A., Galle, S., and Redelsperger, J.-L. 2011. Mesoscale water cycle within the West African Monsoon. *Atmospheric Science Letters* 12(1): 45–50. Doi: 10.1002/asl.309.
- Perez, P., Albergel, J., Diatta, M., Grouzis, M., and Sene, M. 1998. Rehabilitation of semiarid ecosystem in Senegal. 2. Farm-plot experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 70: 19–29. Doi: 10.1016/S0167-8809(97)00157-6.
- Picouet, C., Hingray, B., and Olivry, J. C. 2001. Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: The Upper Niger river basin. *Journal of Hydrology* 250(1–4): 19–39. Doi: 10.1016/S0022-1694(01)00407-3.
- Pouyaud, B. 1972. Premiers jaugeages précis réalisés par l'ORSTOM sur le Congo à Maluku-Trécho. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie* IX (2): 33–38
- Pouyaud, B. 1979. Etude de l'évaporation d'un lac en climat soudano-sahélien : le lac de Bam (Haute Volta). *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie* XVI (2): 89–143
- Pouyaud B. 1987. Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'ouest en liaison avec les changements climatiques. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrology Regime and Water Resources - Proceedings of the Vancouver Symposium*. IAHS 168.
- Quinn, P. F., Beven, K. J., Chevallier, P., and Planchon, O. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes* 5: 59–79. Doi: 10.1002/hyp.3360050106.
- Raous, P., Guiscafré, J., Boyer, J. F., Crespy, A. 1990. PLUVIOM : un logiciel de gestion de données pluviométriques. In: *Systèmes d'information pour l'environnement* edited by P. Séchet. Bondy, France: Seminfar 3, ORSTOM Colloques et Séminaires: 37–47
- Redelsperger, J.-L., Thorncroft, C. D., Diedhiou, A., Lebel, T., Parker, D. J. and Polcher, J. 2006. African monsoon multidisciplinary analysis: An international research project and field campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87 (12): 1739–1746. Doi: 10.1175/BAMS-87-12-1739.
- Ribstein, P., Tiriau, E., Francou, B., and Saravia, R. 1995. Tropical climate and glacier hydrology: A case study in Bolivia. *Journal of Hydrology* 165: 221–234. Doi: 10.1016/0022-1694(94)02572-S.
- Richard, A., Galle, S., Descloitres, M., Cohard, J.-M., Vandervaere, J.-P., Séguis, L., and Peugeot, C. 2013. Interplay of riparian forest and groundwater in the hillslope hydrology of Sudanian West Africa (northern Benin). *Hydrology and Earth System Sciences* 17(12): 5079–5096. Doi: 10.5194/hess-17-5079-2013.
- Riou, C. 1967. Calcul de l'évaporation par la méthode du bilan énergétique en zone sahélienne. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie* 4 (2): 37–46.
- Riou, C. 1972. Etude de l'évaporation en Afrique Centrale. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie* 9(2): 39–51.
- Roche, M. 1968. Traitement automatique des données hydrométriques et des données pluviométriques au service hydrologique de l'ORSTOM. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie* V (3): 3–119.
- Rodier, J., and Auvray, C. 1965. *Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km<sup>2</sup> en Afrique Occidentale*. Paris: ORSTOM-CIEH.

- Rodier, J. A., and Roche, M. 1984. *World Catalogue of Maximum Observed Floods*. IAHS Publ. 143.
- Savéan, M., Delclaux, F., Chevallier, P., Wagnon, P., Gonga-Saholiariliva, N., Sharma, R., Neppel, L., and Arnaud, Y. 2015. Water budget on the Dudh Koshi River (Nepal): Uncertainties on precipitation. *Journal of Hydrology* 531: 850–862. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.040.
- Segura, H., Espinoza, J.-C., Junquas, C., Lebel, T., Vuille, M., and Garreaud, R. 2020. Recent changes in the precipitation-driving processes over the southern tropical Andes/western Amazon. *Climate Dynamics*. Doi: 10.1007/s00382-020-05132-6.
- Servat, E., Hughes, D., Fritsch, J.-M., and Hulme, M. (editors). 1998. *Water Resources Variability in Africa during the 20th Century*. International Conference, Abidjan. IAHS Publ.252
- Servat, E., and Lapetite, J. M. 1990. Transmission par satellite et prévision hydrologique dans le cadre de la lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest. *Hydrologie Continentale* 5 (2): 135–145.
- Servat, E., Najem, W., Leduc, C., and Shakeel, A. (editors). 2003. *Hydrology of the Mediterranean and Semi-Arid Regions: International Conference*, Montpellier. IAHS Publ. 278.
- Sicart, J. E., Villacis, M., Condom, T., and Rabatel, A. 2015. GREAT ICE monitors glaciers in the tropical Andes. *Eos* 96.
- Sighomnou, D., Descroix, L., Genthon, P., Mahé, G., Bouzou Moussa, I., Gautier, E., Mamadou, I., Vandervaere, J. P., DWN-BF, Rajot, J.L., Malam Issa, O., Malam Abdou, M., Dessay, N., Delaitre, E., Depraetere, C., Faran Maiga, O., Diedhiou, A., Panthou, G., Vischel, T., Yacouba, H., Karambiri, H., Mougin, E., Hiernaux, P., Abdourahmane, D., and Adamou, H. 2013. La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ? *Sécheresse* 24 (1): 3–13.
- Soruco, A., Vincent, C., Rabatel, A., Francou, B., Thibert, E., Sicart, J. E. and Condom, T. 2015. Contribution of glacier runoff to water resources of La Paz city, Bolivia (16° S). *Annals of Glaciology* 56(70): 147–154. Doi: 10.3189/2015AoG70A001.
- Tramblay, Y., Rouché, N., Paturel, J. E., Mahé, G., Boyer, J. F., Amoussou, E., Bodian, A., Dacosta, H., Dakhlaoui, H., Dezetter, A., Hughes, D., Hanich, L., Peugeot, C., Tshimanga, R., and Lachassagne, P. 2021. ADHI: the African Database of Hydrometric Indices (1950–2018). *Earth System Science Data* 13: 1547–1560. Doi: 10.5194/essd-13-1547-2021.
- Vauchel, P., Santini, W., Guyot, J. L., Moquet, J. S., Martinez, J. M., Espinoza, J. C., Baby, P., Fuertes, O., Noriega, L., Puita, O., Sondag, F., Fraizy, P., Armijos, E., Cochonneau, G., Timouk, F., de Oliveira, E., Filizola, N., Molina, J., and Ronchail, J. 2017. A reassessment of the suspended sediment load in the Madeira River basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, based on 10 years of data from the HYBAM monitoring programme. *Journal of Hydrology* 553: 35–48. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.018
- Wagnon, P., Lafaysse, M., Lejeune, Y., Maisincho, L., Rojas, M., and Chazarin, J. P. 2009. Understanding the physical processes that govern the melting of snow cover in a tropical mountain environment in Ecuador. *Journal of Geophysical Research* 114 (D19113). Doi: 10.1029/2009JD012292.
- Wendling, V., Peugeot, C., Mayor, A. G., Hiernaux, P., Mougin, E., Grippa, M., Kergoat, L., Walcker, R., Galle, S., and Lebel, T. 2019. Drought-induced regime shift and resilience of a Sahelian ecohydrosystem. *Environmental Research Letters* 14 (10): 105005. Doi: 10.1088/1748-9326/ab3dde.