

REZOC

Centre d'étude des Ressources en Eau

et de la Zone Critique

2^{ème} phase 2024 - 2028

Projet



Jean-Martial Cohard, Agnidé Emmanuel Lawin,
Sounmaila Moumouni, Christophe Peugeot



0. FICHE D'IDENTITE DU LMI

Sigle et Titre complet du LMI

Centre d'étude des Ressources en Eau et de la Zone Critique (REZOC)

Noms, titres et adresses des porteurs pressentis

Dr Agnidé Emmanuel LAWIN, Prof. de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC)

Institut National de l'Eau (INE), UAC, 01 BP 256, Cotonou, Bénin

Dr Jean-Martial Cohard, Maître de Conf. de l'Université Grenoble Alpes (UGA)

Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), UGA, CS 40700, 38058 Grenoble Cedex 9, France

Dr Soumaila Moumouni, Maître de Conf., Ecole Normale Supérieure (ENS) de Natitingou

Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM) d'Abomey, République du Bénin

Dr Christophe Peugeot, CR IRD

Hydrosciences Montpellier, 15 Av. Charles Flahault, 34093 Montpellier Cedex 05, France

Laboratoires / facultés partenaires principaux du projet

Lister ici les laboratoires -ou structures équivalentes-partenaires du Sud et françaises (unités sous tutelle de l'IRD)

Sud :

Institut National de l'Eau (INE), Université d'Abomey-Calavi, Bénin

Ecole Normale Supérieure (ENS) de Natitingou, Bénin

Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM) d'Abomey, Bénin

Nord :

UMR 5001 (IRD, CNRS, UGA, G-INP) : Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Grenoble

UMR 5151 (IRD, CNRS, Univ. Montpellier, IMT-Mines Alès) : Hydrosciences Montpellier

Institutions parties prenantes du projet

Lister ici les institutions (tutelles des laboratoires partenaires principaux du projet) cosignataires de la convention aux côtés de l'IRD

Sud :

Université d'Abomey Calavi (UAC), Bénin

Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM) d'Abomey, Bénin

Nord :

IRD, CNRS, Université de Grenoble Alpes (UGA), Grenoble INP

UMR 050 (IRD, CNRS, Univ. Montpellier, IMT-Mines Alès, IRD, CNRS, UM) : HydroSciences Montpellier (HSM), (France)

Equipes associés au projet (le cas échéant)

Lister ici les laboratoires -ou structures équivalentes- du Sud et françaises/européennes associés au projet :

Sud :

– Direction générale de l'Eau (DG-Eau), Cotonou

– Laboratoire de Cartographie, Télédétection et SIG (LACARTO), Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT/FASHS, Abomey-Calavi, Benin)

– Laboratoire de Physique de l'Atmosphère, Département de Physique, FAST, UAC, Bénin

Nord :

– UMR7330 du CNRS (IRD, CNRS, Univ. Aix Marseille, Collège de France), Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE), Aix-en-Provence, France

– UMR 5194 (CNRS, de l'Univ. Grenoble Alpes, Sciences Po) : laboratoire de sciences sociales (PACTE), Grenoble, France

– UMR 234 (IRD, CNRS, UPS, CNES) : Géosciences Environnement Toulouse (GET), Toulouse France

Institutions associées au projet (le cas échéant)

Lister ici les institutions associées au projet (tutelles des laboratoires associés au projet, organisation gouvernementale, ONG, OIG, fondation, etc.) :

Sud :

- Direction générale de l'Eau (DG-Eau), Cotonou, Bénin
- Institut de Mathématiques et de Sciences Physiques (IMSP), Dangbo, Bénin
- Université Nationale d'Agriculture (UNA) , Bénin
- Faculté des Sciences Humaines et Sociales -FASHS), Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT), Bénin

Nord :

- IRD, CNRS, Université de Montpellier (UM), Université Paul Sabatier (UPS, Toulouse)

Priorité(s) thématique(s) et discipline(s)

Priorités thématiques IRD

- Zone critique, changement global et ressources en eau en Afrique de l'Ouest
- Dynamique urbaine et développement durable dans la zone littorale
- Impact du dérèglement climatique, adaptation aux aléas et Services climatiques
- Mieux insérer les Services nationaux d'observation (SNO) dans les politiques des pays partenaires et dans des efforts coopératifs de portée régionale inter-pays
- Assurer la diffusion, la valorisation et une meilleure lisibilité du patrimoine scientifique issu des sources de données construites en partenariat entre l'IRD et les communautés scientifiques des PED
- Contribuer à l'appropriation de l'agenda 2030 par les chercheurs et les décideurs des PED
- Renforcer les capacités en amont des parcours doctoraux et postdoctoraux

Disciplines

- Hydrologie
- Hydrogéologie
- Géophysique
- Climatologie
- Hydrogéochimie
- Géomatique (Télédétection, SIG et cartographie)

1. Résumé exécutif

Le réchauffement climatique et l'évolution des conditions météorologiques associées, l'accroissement de la pression démographique et les changements d'usage des terres induits, résultent en une intensification sans précédent de la pression humaine sur notre planète. Le cycle de l'eau, rouage essentiel de la machine climatique et pourvoyeur d'une ressource indispensable à la vie sur les continents, est profondément impacté par cette intensification socio-environnementale, particulièrement en Afrique de l'ouest. Le LMI REZOC "Centre d'étude des Ressources en Eau et de la Zone Critique", centré sur le Bénin et plus largement sur l'Afrique de l'Ouest, a pour objectif de mieux comprendre les interactions entre modifications du cycle de l'eau et changements environnementaux entendus au sens large. Ces recherches ambitionnent de contribuer à une mobilisation soutenable des ressources en eau sur une planète en transition rapide, notamment dans des régions où ces ressources sont particulièrement vulnérables. Pour documenter les trajectoires hydro-climatiques des précipitations, des ressources en eau souterraines et de surface, le LMI REZOC s'est construit autour du concept de Zone Critique (ZC), qui définit le milieu d'étude par le continuum couche limite atmosphérique – surface continentale – sols – aquifère. La Zone Critique est le lieu où se développe la quasi-totalité de la vie terrestre continentale en étroite interaction avec le cycle hydrologique. Elle est le lieu impacté par les activités humaines.

Dans sa première phase, le LMI REZOC avait pour ambition de traiter la question de recherche générale : « Quels sont les impacts des trajectoires socio-environnementales actuelles et futures sur les chemins de l'eau dans la zone critique, l'aléa hydrologique, la qualité et la disponibilité de la ressource en eau ? ». Parmi les résultats marquants du LMI-Phase1, on peut citer :

- le développement de modèles de prévision des inondations en lien avec le SAP-Bénin (système d'alerte précoce) ;
- la modélisation du fonctionnement hydrogéologique du plateau d'Allada pour l'approvisionnement en eau potable ;
- l'actualisation de la caractérisation des extrêmes de précipitation pour le Bénin ;
- l'implémentation du modèle intégré ParFlow-CLM sur le centre de calcul de l'IMSP (Bénin) et la formation à l'usage du calcul haute performance en hydrologie ;
- l'analyse de l'impact du pas de temps d'intégration des DSD (Rain Drop Size Distribution) sur leur structuration et leur modélisation.

Les résultats obtenus ont permis à la fois de fédérer une communauté scientifique autour de l'enjeu de l'eau dans la zone critique, mais aussi d'identifier de nouvelles questions, associées à des demandes des gestionnaires de la ressource en eau et des décideurs.

Ainsi, pour sa deuxième phase, le LMI REZOC poursuivra, d'une part, ses études sur les processus, en particulier sur l'identification des chemins de l'eau dans les bassins versants et la quantification des temps de résidence de l'eau dans la ZC et, d'autre part, il s'attachera également à proposer des outils et des méthodes de diagnostic, basés sur la co-construction et les résultats de la recherche, pour la gestion de la ressource en eau souterraine et des eaux de surface, pour un développement durable sur le territoire béninois, et transposables à d'autres pays de l'Afrique de l'Ouest. En particulier, les aquifères des zones de socle du Bénin, peu productifs, ne permettent pas aux stratégies usuellement mises en œuvre de fournir les débits nécessaires à l'alimentation en eau potable des populations. A partir des données de l'observatoire AMMA-CATCH (Galle et al, 2018), qui documente l'impact hydrologique du changement global en Afrique de l'Ouest (Bénin, Niger, Mali) sur le long terme et des résultats obtenus par le LMI REZOC, l'objectif sera de proposer aux autorités béninoises et à celles des pays voisins de nouvelles stratégies de mobilisation des ressources pour ces régions qui concernent 80 % du territoire béninois, ~40% de l'Afrique sub-saharienne, et qui nécessitent des études d'impacts intégrées pour une gestion de l'eau soutenable en partage. Les zones côtières au sud abritent ~18% de la population béninoise, soit ~1,8 millions de personnes à alimenter en eau potable¹. Elles sont situées en zone sédimentaire où les aquifères sont vulnérables aux intrusions salines de l'océan atlantique et des systèmes lagunaires, et où le changement d'usage des terres mettent au défi les gestionnaires de la ressource en eau. Le LMI REZOC travaillera sur le développement d'un modèle de zone critique dédié à la gestion de ces aquifères côtiers.

Enfin, l'intensification du régime hydrologique a entraîné des crues plus fréquentes et plus importantes, qui, combinées à une extension des activités économiques et de l'urbanisation dans les zones potentiellement

¹ <https://documents1.worldbank.org/curated/en/977621512742389576/pdf/121976-REVISED-FRENCH-second-rev-WACA-Benin-MSIP-4211183024-Benin-Rapport-FR-v4-2-10112017.pdf>, page 10, 2e paragraphe

inondables, ont considérablement accru les dommages. Ainsi, depuis l'origine des mesures (1950), les cinq crues de l'Ouémé les plus impactantes ont été observées dans les dix dernières années. Les décideurs souhaitent des outils de gestion et d'alerte pour la gestion des risques actuels et futurs, outils qui ne peuvent être bâtis qu'avec de solides connaissances des processus et une vision intégrée de la Zone Critique. La capacité d'attribuer les changements dans le cycle de l'eau, les basculements du fonctionnement hydro-climatique, et les risques associés au changement climatique (crues, sécheresse, contamination,...), à l'anthropisation des milieux, notamment la déforestation et l'implantation d'ouvrages ou à leur co-évolution, est un enjeu majeur. L'observatoire AMMA-CATCH est un dispositif conçu pour documenter la ZC sur le long terme permettant de documenter ces changements. Toutefois il est restreint à la partie centrale du Bénin entre Djougou et Parakou, loin d'apporter les réponses à tous les enjeux scientifiques et sociétaux identifiés, dont un grand nombre sont localisés au Sud du pays. Le LMI pourra ainsi être un moteur pour ajuster le dispositif AMMA-CATCH, qui pourra être partiellement redéployé, pour mieux répondre, en matière d'observation, à des questions scientifiques ancrées territorialement.

Le LMI REZOC-phase 1 était co-porté par l'Institut National de l'Eau (INE) au Bénin, et l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), en France. L'INE, créé en 2013, fédère les laboratoires de l'Université d'Abomey Calavi (UAC) travaillant dans le domaine de l'Eau et de l'Assainissement. Depuis sa création, l'INE a restructuré les enseignements de l'hydrologie et des ressources en eau et a acquis une visibilité internationale dans ce domaine (projets WASCAL, Centre d'Excellence C2EA, PAUWES, MAREMA). L'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) de Grenoble observe et modélise les relations entre le climat, l'environnement et le cycle de l'eau. L'IGE mène des recherches en Afrique depuis plus de trente ans et collabore avec les partenaires de l'INE depuis 2002 dans le cadre de l'observatoire AMMA-CATCH.

Pour le projet de renouvellement du LMI, il est proposé d'introduire au co-portage, l'Ecole Normale Supérieure (ENS) de Natitingou, département de l'Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM) au Bénin et l'UMR HydroSciences Montpellier en France.

Par la nature pluridisciplinaire de l'étude de la ZC, dans sa nouvelle phase le LMI REZOC intégrera d'autres partenaires au sud comme au nord (IMSP/UAC, LPA/UAC, DGAT/FASHS/UAC, CEREGE, PACTE). Cela permettra l'intégration et la reconnaissance de nouvelles compétences au sein du LMI (telles que les mathématiques appliquées, la physique de l'atmosphère, l'hydro-écologie, la géographie, géomatique, la géochimie, etc.) et une meilleure articulation des différentes activités. Dans ce cadre, les objectifs spécifiques du LMI REZOC II sont : (i) consolider les acquis de la première phase et autonomiser le fonctionnement du laboratoire sur le long terme afin de permettre la compréhension des processus de transfert dans la zone critique dans un contexte d'intensification des pressions socio-environnementales ; (ii) fournir les connaissances scientifiques appropriées pour l'évaluation des risques et la gestion soutenable des ressources en eau et de leur qualité ; (iii) veiller au transfert des nouveaux savoirs acquis, aux étudiants, aux opérationnels et aux décideurs, au Bénin et plus largement en Afrique de l'Ouest ; (iv) renforcer les synergies avec la plate-forme d'observation AMMA-CATCH pour mieux intégrer les besoins en observations pour les thèmes mis en avant par les partenaires du Sud.

Le LMI REZOC sera structuré autour de quatre thèmes qui associent demande sociétale et question de recherche et une cellule « formation et valorisation » qui interagira étroitement avec les différents thèmes (Figure 1 ci-dessous). Les trois premiers thèmes de recherche sont ancrés territorialement sur des enjeux sociétaux, le quatrième est plus méthodologique ciblés sur les processus et viendra nourrir et préciser les outils nécessaires aux thèmes précédents. Le LMI s'appuiera sur plusieurs plateformes, en particulier la plateforme d'observation AMMA-CATCH.



Figure 1. Les 4 thèmes de recherche/action du LMI REZOC appuyés autour de la cellule dédiée à la formation, la valorisation et la dissémination. Les actions de chaque thème pourront s'appuyer sur les plateformes à disposition du LMI: le SNO AMMA-CATCH, les moyens géophysiques de la DG-eau, le laboratoire de géochimie isotopique de l'INE, Le centre de calcul de l'IMSP, l'IRD pour ses outils et l'INE pour ses projets tel que le centre d'excellence C2EA.

2. Analyse SWOT

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> - Liens avec des questions sociétales de 1^{ère} importance et actions en lien avec les acteurs du domaine de l'eau - Proximité avec ces acteurs, acquise via des collaborations de longue date - Cohésion de l'équipe d'animation, forte d'une collaboration de plus de 20ans - Synergie avec l'observatoire AMMA-CATCH (moyens techniques, budget récurrent, personnels dédiés aux opérations de terrain) - Vivier de jeunes docteur.e.s et doctorant.e.s très dynamiques et impliqué.e.s 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de personnel technique dédié pour activités de terrain chez les partenaires du Sud - Temps disponible limité chez les enseignants - chercheurs particulièrement ceux du Sud et pas d'ouvertures de postes annoncées par les institutions.
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> - Développer des activités de « recherche-action », co-construites, répondant à des besoins exprimés au Bénin - Réorganisation des axes de recherche de la première phase vers plus d'agilité (mode projet) - Transfert des résultats scientifiques vers les acteurs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Non pérennisation des activités du LMI au delà de la phase de soutien par l'IRD (pas assez de moyens, de personnel technique dédié) : - Non obtention de financements complémentaires à celui de l'IRD - Problème sécuritaire en Afrique de l'Ouest

3. Activités de recherche, de formation et de transfert

1. Contexte et problématique générale

La zone critique est la zone située entre les aquifères et la basse atmosphère berceau des ressources en eau et de l'ensemble de la biodiversité dont l'Homme. C'est aussi l'interface où l'Homme puise les ressources pour l'ensemble de ses activités, où il doit composer avec les aléas et où il transforme et impacte massivement la planète. La zone « critique » (ZC) pose donc directement la question de la trajectoire des sociétés humaines dans l'Ecosystème-Terre: comment prospérer sans nuire de manière irréversible à notre environnement ? La connaissance de la ZC est donc indispensable pour adapter nos pratiques et limiter notre empreinte, et dans l'attente d'un nouveau paradigme plus respectueux de l'environnement dont nous faisons partie intégrante, s'adapter aux changements en cours.

Les changements climatiques en cours, l'accroissement de la pression démographique et les changements d'usage des terres associés résultent en une intensification sans précédent de la pression humaine sur notre planète. En particulier, le cycle de l'eau, rouage essentiel de la machine climatique et pourvoyeur d'une ressource indispensable à la vie terrestre, est profondément impacté par cette intensification, particulièrement en Afrique de l'ouest (Taylor *et al.*, 2022, Chagnaud *et al.*, 2022, 2023). Le LMI REZOC, centré sur le Bénin mais avec une perspective régionale, a pour objectif de mieux comprendre les interactions entre modifications du cycle de l'eau et changements environnementaux entendus au sens large. Ces recherches ambitionnent de contribuer à une mobilisation soutenable des ressources en eau sur une planète en transition rapide, notamment pour des régions où elles sont particulièrement vulnérables. Au Bénin, l'intensification hydrologique se traduit d'abord par une augmentation depuis trois décennies des précipitations (+10%) et des extrêmes (+14%) (Nkrumah *et al.*, 2019). Ces augmentations entraînent des crues causant des victimes et des dégâts matériels toujours plus marquants. En particulier, en 2010, 70 % des communes ont été touchées, 680.000 personnes ont été affectées avec 46 décès et d'énormes quantités de récoltes détruites. L'évaluation post inondation réalisée par le gouvernement avec l'appui du PNUD a estimé les pertes et dommages à près 127 milliards de FCFA (194 millions d'euros, 4 % du PIB). Selon le Ministère Béninois de l'Economie et des Finances, les pertes et dommages des inondations de 2022 sont évalués à 190 milliards de FCFA (290 millions €). D'autre part ces extrêmes de précipitation impactent aussi la recharge des nappes et l'ensemble du cycle hydrologique (Taylor *et al.* 2013, Cuthbert *et al.*, 2019). Au Bénin, comme dans toute l'Afrique de l'Ouest, les épisodes d'inondations côtoient les épisodes de vagues de chaleur (Russo *et al.*, 2016, Yarou *et al.*, 2021). Ces extrêmes touchent la sécurité alimentaire et l'approvisionnement en eau des populations (Defrance *et al.*, 2020, Sultan *et al.*, 2019) qui est un des objectifs majeurs des ODD (ODD

n° 6) et dont le gouvernement du Bénin fait l'une de ses priorités. L'important taux de croissance de la population (2,7 %, soit un doublement en 26 ans²) impose de redéfinir les stratégies d'approvisionnement en eau et en énergie, et de gestion soutenable de ces ressources. Par ailleurs, pour satisfaire la demande en produits agricoles, le gouvernement béninois met le développement des plantations et des grandes cultures au cœur de son programme d'action³, impliquant de nouvelles mobilisations des ressources en eau pour l'irrigation. Ces politiques se traduisent par de nombreux projets de mobilisation des eaux souterraines, de construction de réservoirs multi-usage, ou l'aménagement et la mise en culture des zones humides naturelles en tête de bassin, dites « bas-fonds ». De ces problématiques ont émergé la question scientifique fondatrice du LMI REZOC .

Question scientifique : Quels sont les impacts des trajectoires socio-environnementales actuelles et futures sur les chemins de l'eau dans la zone critique, l'aléa hydrologique, la qualité et la disponibilité de la ressource en eau au Bénin et en Afrique de l'Ouest ?

Au Bénin, le fonctionnement de la Zone Critique est très contrasté. Les processus hydrologiques dominants varient du Sud au Nord. La zone côtière, sous climat guinéen, montre des précipitations annuelles supérieures à 1400 mm, des écoulements pérennes et une recharge diffuse annuelle des nappes estimées entre 150 et 500 mm (Kotchoni *et al.*, 2019). La zone centrale entre 7° et 10° de latitude nord, sous climat soudanien, reçoit ~1100 mm de pluie, et la subsurface et la végétation jouent un rôle dominant dans le cycle hydrologique, entraînant une recharge diffuse <100 mm/an et des écoulements intermittents (Kotchoni *et al.*, 2019, Fovet *et al.* 2021, Hector *et al.*, 2018). Au Nord Bénin, sous climat sahélien, les précipitations annuelles diminuent fortement avec la latitude. Les événements sont produits par des systèmes convectifs de méso-échelle de forte intensité, mieux structurés qu'au Sud du pays (Badou *et al.*, 2018), le ruissellement de surface devient dominant dans les écoulements et la recharge devient majoritairement localisée. Les études citées, réalisées dans le cadre de la phase 1 du LMI REZOC, ont permis des avancées notables sur la compréhension de ces processus. Toutefois, il reste encore à quantifier les flux d'eau et leur variabilité temporelle et spatiale pour les différents chemins de l'eau identifiés. Au delà des précipitations, les trajectoires passées et futures pour la recharge des aquifères et les débits des cours d'eau restent à caractériser, en s'appuyant sur les méthodologies déployées en zone sahélienne (Chagnaud *et al.* 2021, Wilcox *et al.* 2018). La mise en place de modèles de Zone Critique intégrateurs de l'ensemble des processus a été initiée (Herzog *et al.*, 2021) et se poursuit dans le cadre de thèses en cours. Cela reste à finaliser pour réaliser des études d'impact et d'attribution à partir de scénarii de changement climatique et/ou de changement d'occupation des terres. Enfin, ces avancées doivent permettre de mieux gérer les ressources en eau en travaillant de manière conjointe avec les différents acteurs du domaine de l'eau. Des actions ont d'ores et déjà été menées en ce sens (Kotchoni *et al.*, 2019, Sossou *et al.*, *in .prep.*) dans le cadre du LMI REZOC.

De manière générale, la direction du LMI REZOC sera très attentive à ce que des acteurs béninois, notamment non académiques, soient étroitement associés à chaque action décrite ci-dessous, tout au long de leur développement. Une partie de ces acteurs est déjà identifiée via les collaborations anciennes (ex. SAP pour les inondations, SONEB pour les questions d'alimentation en eau potable). L'atelier de Cotonou organisé en mars 2022⁴ a permis de créer des liens avec de nouveaux acteurs, notamment à propos des projets de barrages. Cet exercice de co-construction sera poursuivi pour renforcer les interactions science/société.

Le LMI REZOC sera organisé autour de quatre thèmes de recherche & développements et d'une cellule pour la **formation et la valorisation**. Les thèmes comprennent : **ressources en eau souterraine dans les bassins sédimentaires côtiers**, en particulier ceux qui alimentent les grandes villes du sud Bénin ; **Ressources en eau souterraine et de surface en zone de socle au Bénin**, où les processus hydrologiques contraignent l'accès à la ressource et conditionnent les régimes de crue et d'étiage des cours d'eau au Sud ; **intensification hydrologique**, intégrant les changements climatiques et les pressions anthropiques; **Chemins de l'eau dans la zone critique**, afin de poursuivre l'identification et la quantification des flux, en particulier les échanges surfaces/atmosphère et nappe/rivière. Chacun de ces thèmes est associé à des objectifs opérationnels. Les objectifs spécifiques envisagés sont décrits dans la suite du document.

Le LMI REZOC devra enfin travailler à son autonomisation financière. Plusieurs actions ont été cofinancées lors du précédent exercice, que ce soit par le financement de thèses et de matériel ou pour des actions de formation,

² source UNFPA : <https://www.unfpa.org/data/world-population-dashboard>

³ <https://beninrevele.bj/projet/124/programme-national-developpement-plantations-grandes-cultures-pndpgc-/>

⁴ <https://rezoc.osug.fr/Actu-3>

comme l'école de terrain (financements bilatéraux de la coopération néerlandaise, Centres d'Excellence d'Afrique C2EA et SMIA, projet OWSD, IRD). Cette dynamique gagnant-gagnant sera poursuivie. D'autre part conformément à sa nouvelle politique partenariale, la plateforme d'observation AMMA-CATCH (Galle et al., 2018) au Bénin sera en partie redéployée afin de mieux répondre aux questions scientifiques posées par le LMI REZOC. Il s'agira d'une part de couvrir une plus grande région incluant le Sud du Bénin, et d'autre part d'intégrer dans le dispositif AMMA-CATCH, pour ceux qui le souhaitent, les sites complémentaires qui resteront gérés par les partenaires. Une réflexion collective sera menée à cet effet. Cette meilleure adéquation entre les différents outils portés par les membres du LMI REZOC au Bénin sera un gage pour leur pérennité.

2. Ressources en eau souterraine dans les bassins sédimentaires côtiers (F. Lawson, J.-M. Vouillamoz)

L'accès universel à l'eau des populations est un objectif qui préoccupe l'ensemble des acteurs du développement et auquel la recherche tente d'apporter une contribution. Au Bénin, l'une des préoccupations majeures du gouvernement concerne l'alimentation en eau des grandes villes du pays de manière soutenable. Dans la zone sédimentaire côtière qui abrite les plus grandes agglomérations du Bénin, la stratégie actuelle repose sur l'exploitation intensive de l'aquifère du Mio-Pliocène, alors même que la durabilité des prélèvements reste inconnue. L'un des risques majeurs lié à la forte sollicitation de cet aquifère est une intrusion d'eau salée provenant de l'océan ou des lacs et lagunes en connexion avec lui. Pour permettre une gestion raisonnée de cet aquifère, des travaux permettant de déterminer ses propriétés ont été initiés sur les deux plateaux méridionaux (Allada et Sakété) où s'effectue une exploitation intense de la ressource. Cette caractérisation a permis de construire un premier modèle numérique des écoulements souterrains du plateau d'Allada (Figure 2). Ces travaux engagés lors de la première phase du LMI-REZOC demandent à être poursuivis dans sa deuxième phase pour à la fois finaliser les résultats attendus et rendre disponible un outil pratique d'aide à la gestion pour les acteurs opérationnels, mais aussi mieux cadrer les hypothèses sous-jacentes à l'outil réalisé en particulier en lien avec l'occupation des terres dans la zone d'alimentation de l'aquifère.

a) Construction d'un outil de gestion de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada basé sur l'amélioration de la connaissance des écoulements souterrains (F. Lawson, J.-M. Vouillamoz).

Nous avons élaboré un modèle numérique explicatif du fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère du Mio-Pliocène exploité pour alimenter le Grand-Cotonou (15 % de la population du pays, Figure 2). Sur la base des prélèvements actuels et de ceux projetés en 2050, le modèle indique que les champs captant actuellement en exploitation impactent déjà significativement l'aquifère, et que les prélèvements projetés pour 2050 induiraient une intrusion d'eau de surface depuis le lac Nokoué au Sud-Ouest, et probablement de puis l'océan au Sud (Fig.2).

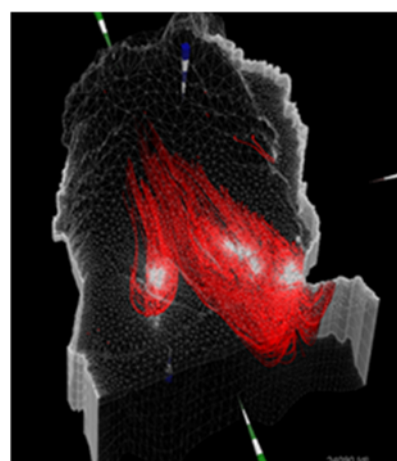
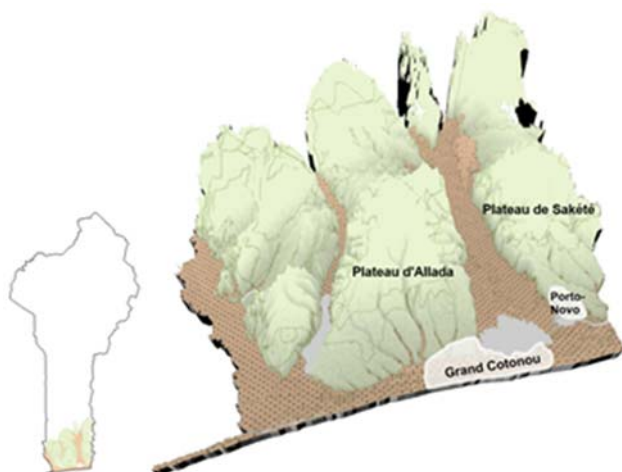


Figure 2. Localisation de la zone d'étude (à gauche) et résultats de la modélisation de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada (à droite). La zone de l'aquifère mobilisée par les pompes actuelles est figurée en rouge.

Toutefois, ce modèle souffre de certaines

limites sur lesquelles il est nécessaire de travailler pour réduire les incertitudes. Il s'agit notamment de (1) la simulation de l'infiltration de la pluie qui pour l'heure n'est pas bien contrainte, occasionnant ainsi une incertitude importante sur la recharge de l'aquifère, (2) la non prise en compte de l'évolution de la recharge dans le temps, qui est certainement dépendante de la variabilité climatique, (3) les incertitudes sur certaines conditions aux limites contrôlant les relations aquifère - eaux de surface (en gris sur la Fig. 2). Les incertitudes et leurs impacts sur la robustesse du modèle seront précisées avant de faire évoluer l'outil numérique actuel orienté « recherche » vers

un outil de gestion pour les acteurs opérationnels (T1L1). Certaines de ces incertitudes seront spécifiquement étudiées dans le cadre de l'action 2.c pour améliorer la précision du modèle opérationnel.

- b) Inclure l'aquifère Mio-Pliocène du plateau de Sakété dans la démarche de gestion raisonnée des prélèvements à partir de l'amélioration de la connaissance de ses propriétés (F. Lawson, J.-M. Vouillamoz).

Le réseau de distribution d'eau potable de la capitale Porto Novo est alimenté par l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau de Sakété (Fig. 2). Des travaux récents ont montré que les aquifères du Mio-Pliocène des plateaux de Sakété et d'Allada sont probablement connectés hydrauliquement. Le modèle numérique des écoulements souterrains du plateau d'Allada pourrait donc être élargi au plateau de Sakété. Cependant, la connaissance actuelle des propriétés hydrogéologiques de l'aquifère sous le plateau de Sakété est insuffisante pour construire un modèle numérique suffisamment contraint. En suivant la démarche de caractérisation des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère par une approche hydrogéophysique mise en place sur le plateau d'Allada au cours de la première phase du LMI REZOC (thèse A. Allassane), nous proposons de réaliser des mesures hydrogéophysiques complémentaires sur cet aquifère dans la région de Sakété et mieux contraindre un modèle numérique de gestion de la ressource en eau souterraine. Ces mesures sont rendues possibles grâce à la présence de l'équipement géophysique à la Direction Générale de l'Eau, partenaire du LMI (T1L2).

- c) Développement d'outil de gestion à long terme des eaux souterraines à partir de l'évaluation de l'impact de la végétation sur la recharge des aquifères dans le bassin sédimentaire côtier (B. Hector, F. Lawson)

La bonne connaissance de la variabilité future de la recharge des aquifères du bassin sédimentaire côtier conditionnera, dans une perspective de GIRE⁵, la bonne planification de l'exploitation de la ressource. Dans la suite logique des actions précédentes, nous proposons d'intégrer la prise en compte de l'occupation des sols dans la caractérisation de la recharge des aquifères du bassin sédimentaire côtier. D'une part, les changements d'occupation des sols induits par la conversion des couvertures forestières en zones agricoles et l'imperméabilisation des sols consécutive à l'urbanisation rapide⁶ donnent lieu à une modification importante des processus hydrologiques à l'interface atmosphère, végétation-sol-sous-sol. D'autre part, suivant les hypothèses de Taylor *et al.* (2013), l'intensification des régimes de précipitation pourrait contribuer à des recharges plus importantes lors des événements extrêmes. Nous proposons donc d'établir des scénarii combinés réalistes de climat (CMIP6) et d'occupation des terres, associés à des scénarii de demande pour la ressource en eau. Certains de ces scénarii seront testés avec le modèle intégré des aquifères côtiers Parflow/CLM (Maxwell & Miller, 2005) afin de fournir des données fondamentales pour l'élaboration d'outil de planification à long terme (Thèse O. Agon).

Il s'agira (1) d'évaluer la robustesse des scénarii d'occupation du sol développés dans le cadre des projets RIVERTWIN (Bossa, 2012), ANR TipHyc et CECC pour le bassin de l'Ouémé et limité à l'horizon 2029 et d'actualiser ces scénarii à l'horizon 2050 en s'appuyant sur le Plan National de Développement du Bénin (Ministère du Développement, 2018) ; (2) d'établir des relations entre extrêmes de précipitation et recharge à partir des longues séries de données disponible sur le plateau d'Allada pour (3) en déduire des scénarii de recharge des aquifères du bassin sédimentaire côtier contraint par les scénarii combinés d'occupation des sols et de climat futur (T1L3).

3. Ressources en eau souterraine et de surface en zone de socle au Bénin (B. Hector, F. Badou)

La question de l'accès à l'eau et les défis associés mentionnés dans la section précédente sont particulièrement prégnants dans les régions de socle où la géologie rend cette ressource difficile d'accès et sa durabilité mal connue. Les travaux scientifiques antérieurs, notamment ceux réalisés dans le cadre du LMI REZOC, ont contribué à apporter un début de réponse pour lever des verrous scientifiques, mais aussi proposer des solutions pratiques aux acteurs opérationnels. Parmi ces travaux, certains demandent d'être poursuivis.

- a) Amélioration de la productivité des forages basée sur la révision du modèle conceptuel des aquifères de socle (F. Lawson, J.-M. Vouillamoz).

⁵ Gestion Intégrée des Ressources en Eau

⁶ <https://habitat3.org/wp-content/uploads/National-Report-Africa-Benin-French.pdf>

Les forages réalisés en zone de socle au Bénin sont peu productifs (débit médian au Bénin de 1,8m³/h) alors que les débits recherchés pour soutenir la stratégie actuelle d’approvisionnement en eau potable sont d’au moins 5 m³/h. Or, l’identification des facteurs qui contrôlent au premier ordre la productivité des forages demeure une question ouverte tant pour les chercheurs que pour les acteurs opérationnels. Des résultats contradictoires ont été obtenus dans des études récentes : pour certains, la fracturation tectonique, qui depuis longtemps est ciblée pour l’implantation des forages, joue le rôle principal dans la productivité du milieu, alors que pour d’autres, c’est plutôt l’épaisseur de l’altération qui joue ce rôle (Vouillamoz *et al.*, 2015a et Figure 3).

Les travaux envisagés dans la deuxième phase du LMI REZOC visent à revisiter le modèle conceptuel des aquifères de socle afin de préciser la cible hydrogéologique adaptée pour l’identification des sites les plus productifs. La méthode consistera à s’appuyer sur des bases de données de forage robustes pour comparer la productivité des forages existants avec des variables susceptibles d’en contrôler les propriétés. Les travaux comprendront notamment : l’élaboration d’un protocole d’analyse d’image aérienne (satellitaire et drone) pour identifier les linéaments, des mesures géophysiques pour comprendre la signification de ces linéaments, la consolidation de base de données de forage et leur analyse grâce à des approches multi-variables et IA - Thèse A. Kinglo (T2L3).

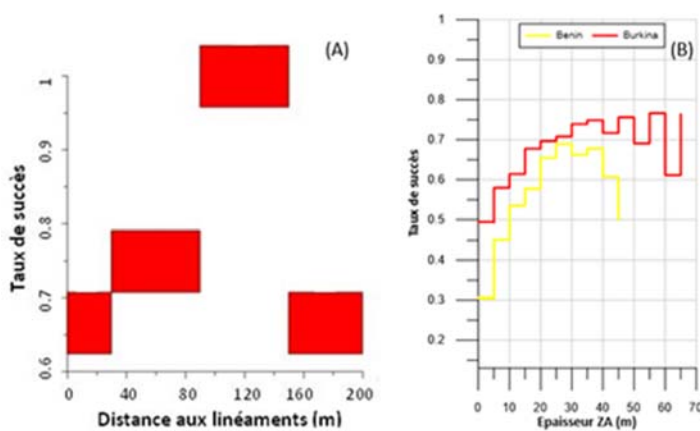


Figure 3. Productivité des forages (évalué par le taux de succès à 0,7 m³/h) et cibles hydrogéologiques. A : taux de succès et distance aux linéaments en zone de socle au Bénin. B : taux de succès et épaisseur d’altération (ZA) en zone de socle au Bénin et au Burkina Faso (ASAO, 2019).

b) Quantification de la durabilité des prélèvements en eau souterraine basée sur une meilleure compréhension des processus de recharge (F. Lawson, J.-M. Vouillamoz)

La durabilité des prélèvements actuels en eau souterraine et de ceux envisagés pour satisfaire l’augmentation des besoins pour les différents usages est très peu connue. Toutefois, des observations semblent indiquer que les gros prélèvements actuels ne sont pas pérennes. La durabilité des prélèvements est notamment contrôlée par les volumes d’eau disponibles (les stocks actuels) et leur renouvellement (la recharge). Les travaux antérieurs ont permis de quantifier le stock d’eau souterraine disponible dans une partie du socle Béninois (~500 l/m², Vouillamoz *et al.*, 2015b), mais il est nécessaire d’étendre cette quantification pour couvrir la grande variété de roches de socle du pays. Concernant la recharge, les travaux de Kotchoni *et al.* (2019) ont montré qu’une faible proportion des stocks est généralement renouvelée annuellement (environ 25 à 150 l/m²). Exceptionnellement, les stocks sont renouvelés par des volumes plus importants (environ 300 l/m², Figure 4) dans certaines régions de socle. Il est maintenant nécessaire de comprendre comment la recharge est spatialisée à l’échelle du pays afin de donner des indications aux acteurs opérationnels concernant la durabilité des prélèvements (Fig. 4).

Les travaux envisagés dans la deuxième phase du LMI REZOC visent à identifier des proxys de la recharge pour sa quantification et sa spatialisation à l'échelle de la zone de socle du Bénin. La méthode consistera à s'appuyer sur des bases de données expertisées pour quantifier la recharge à partir des variations de stocks enregistrées. Les principaux travaux consisteront à développer un outil numérique de quantification de la recharge et à chercher les relations entre recharges calculées et variables climatiques (T2L1). Sur la base de ces relations, l'évolution de la recharge dans les prochaines décennies sera évaluée à partir des scénarii climatiques.

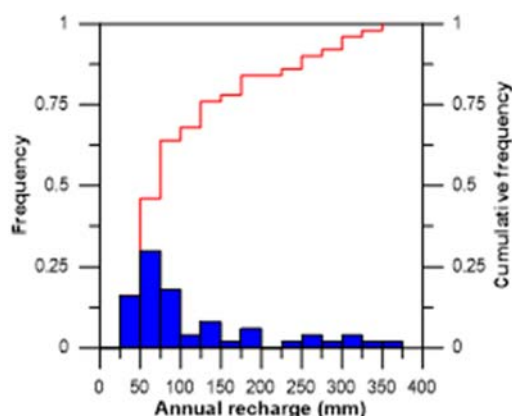


Figure 4. Estimation du renouvellement (recharge) des aquifère en zone de socle au Bénin

c) **Modélisation intégrée hyper-résolue des impacts des changements globaux sur les ressources en eau de l'Ouémé et conséquences pour la GIRE (J-M. Cohard, E. Lawin).**

Le fonctionnement hydrologique des zones de socle est très lié à la végétation en surface. En climat soudanien, les précipitations s'infiltrent majoritairement et sont reprises par la végétation tout au long de l'année. La recharge des nappes et les débits des rivières dépendent donc des besoins de la végétation. Le modèle hydrologique distribué de Zone Critique Parflow-CLM permet de simuler explicitement les couplages entre végétation et cycle de l'eau. Des simulations à très haute résolution ont été réalisées et ont permis de représenter ces processus (Hector *et al.*, 2018). D'autre part, les simulations de Herzog *et al.*, (2021) ont montré que les contributions des aquifères profonds aux écoulements de l'Ouémé à Bétérou sont très faibles. Ces travaux se poursuivent (Thèse M. Houngnibo) pour réaliser des simulations sur l'ensemble du bassin de l'Ouémé afin de quantifier les apports d'eau douce (surface et souterrain) au lac Nokoué pour différents scénarii d'occupation du sol et de climat. On s'appuiera en particulier sur les cartes d'occupation du sol de Tappan *et al.* (2016) disponibles pour les années 1975, 2000 et 2013, et sur les données climatiques issues de la réanalyse ERA5 (T2L2). Ces simulations permettront également d'estimer la recharge diffuse des nappes et les débits de l'Ouémé et de ses affluents à une résolution kilométrique. Les simulations seront évaluées à l'aide des données de l'observatoire AMMA-CATCH et des chroniques de débit de la DG-Eau. Les différents scénarii permettront de simuler la sensibilité des ressources en eau au changement d'occupation des terres et au climat. A partir de ces résultats, un rapport sera transmis au Ministère de l'Eau et des Mines et à la DG-Eau afin de leur fournir des éléments d'aide à la décision pour la GIRE (T2L4).

d) **Cartographie des bas-fonds à l'aide des données de télédétection et de SIG dans le bassin versant de l'Ouémé au Bénin (M. Djaouga et P. Dusseux)**

L'intérêt agro-écologique des bas-fonds est devenu stratégique pour plusieurs acteurs du monde agricole pour permettre une transition vers des systèmes agricoles plus soutenables (Côte *et al.*, 2019). En Afrique subsaharienne, on estime à plus de 200 millions d'hectares la superficie des bas-fonds encore inexploités (AfricaRice, 2010). Au Bénin, la superficie totale des zones humides et des terrains hydromorphes est estimée à 205 000 ha dont 160 000 ha de bas-fonds (Souberou *et al.*, 2016). Les bas-fonds sont aussi des objets hydrologiques, lieux de génération des écoulements (Hector *et al.*, 2018). Leur aménagement massif aura un impact sur l'hydrologie de surface, à minima en ralentissant les écoulements. Cette action vise à faire une cartographie détaillée des bas-fonds dans le bassin de l'Ouémé afin de pouvoir faire un état des lieux de ces objets au Bénin et de leur potentiel agro-écologique, de suivre leur transformation par les aménagements, et de pouvoir modéliser, selon des scénarii de transformation, la sensibilité du cycle hydrologique à ces transformations. La cartographie des bas-fonds se fera à travers la combinaison et la superposition des critères établis à partir du NDVI, de la pente et des zones d'accumulation d'eau issues de l'exploitation des images Sentinel, Landsat ETM+ et ASTER DEM (T2L5).

e) **Etude de l'impact des projets de barrages sur le fonctionnement hydrologique du delta de l'Ouémé par la mise en place d'une modélisation hydraulique (R. Houngué et C. Peugeot)**

La construction d'ouvrages hydroélectriques multi-usages est planifiée sur le cours principal du fleuve Ouémé, dont le barrage de Dogo-Bis (production projetée de 128 MW, potentiel d'irrigation de 5000 ha). Ces barrages auront des conséquences sur le fonctionnement du delta de l'Ouémé, la zone nourricière du sud Bénin

(agriculture, notamment de décrue, réservoir de ressource halieutique, richesse en écosystèmes) et sont susceptibles d'influencer la recharge des nappes (Boukari *et al.*, 2023, Nazoumou, 2011). La grande diversité des acteurs concernés par les impacts de ces ouvrages positionne ces derniers au cœur des enjeux contemporains de la Zone Critique. L'atelier multi acteurs organisé par le LMI REZOC et la DG-Eau (mars 2022⁷) a permis d'identifier ces impacts et leurs perceptions par les différents acteurs et de prioriser les actions de recherche à mener. La relecture du rapport de l'étude stratégique et technico-économique du Barrage de Dogo-Bis (Zannou *et al.*, 2017) sous l'angle « Zone Critique » constituera un cas d'étude pour quantifier les apports d'une approche intégrée pour la GIRE. L'étude de Zannou *et al.* (2017) propose une estimation des débits écologiques à réserver (de l'ordre de 2,7 m³/s à Bonou) mais aussi un modèle économique d'exploitation du barrage. Cependant, ce document et d'autres études fournissent très peu d'informations sur l'impact hydrologique de ce barrage à l'aval notamment sur le delta de l'Ouémé (temporalités et quantification des débits et hauteurs d'eau) et sur les conséquences sur les écosystèmes et l'agriculture de décrue. Pourtant, les ouvrages situés dans des contextes similaires dans des pays voisins montrent des bouleversements majeurs des flux d'eau (Ago *et al.*, 2005, Amoussou *et al.*, 2020). Nous proposons d'aborder une partie de ces impacts en étudiant, à partir d'outils de modélisation existants (HEC-RAS, Hounoue *et al.*, 2020), l'effet du barrage sur i) l'écrêtement des crues et son effet atténuateur sur les inondations en aval ; ii) la modification de la saisonnalité du débit et des hauteurs d'eau (notamment en étiage) dans le Delta de l'Ouémé, en utilisant des scénarios de turbinage du barrage ; iii) la recharge des nappes du Delta de l'Ouémé (T2L6). Ces travaux se baseront sur une étude préliminaire de modélisation démarrée dans la phase 1 du LMI (Hounoue 2020). Dans la deuxième phase du LMI REZOC, il est prévu de raffiner l'approche par la collecte de données complémentaires (notamment bathymétriques, hydrogéologiques) et d'étendre les études aux autres projets de barrage programmés sur l'Ouémé. Les résultats de cette action seront synthétisés dans des notes d'information (« policy-briefs ») à destination des parties prenantes (T2L7).

4. Intensification Hydrologique (H. Kougbegbede, T. Vischel)

La gestion des événements hydro-météorologiques extrêmes est un défi majeur pour les gestionnaires de l'eau, les utilisateurs et les décideurs politiques, d'autant plus que la fréquence et l'amplitude de ces événements augmentent partout sur la planète (VI^{ème} rapport du GIEC). L'Afrique de l'Ouest et en particulier le Bénin n'y échappe pas (Nkrumah *et al.*, 2019, Panthou *et al.*, 2014). Dans un contexte d'augmentation démographique, d'anthropisation des surfaces, en particulier d'urbanisation et de concentration dans les villes, les populations et les infrastructures deviennent plus vulnérables. Dans ce contexte, une meilleure caractérisation de ces événements hydro-météorologiques extrêmes (précipitations, séquences sèche, crues, etc.), via l'observation, la modélisation et leur intégration dans les outils d'aide à la décision, est une étape nécessaire pour renforcer la capacité des acteurs à gérer ou à s'adapter à ces aléas hydrologiques (Météo Bénin, SAP⁸, Sécurité civile, etc.). L'objectif de ce thème est donc de caractériser les événements hydro-météorologiques extrêmes du Bénin et leur trajectoire dans un contexte de non stationnarité, afin de construire des outils d'aide à la décision pour l'alerte de crue ou pour l'aide au dimensionnement des ouvrages.

a) Analyse des fréquences et des tendances des régimes de précipitation et des extrêmes (H. Kougbegbede, G. Panthou)

Le Bénin dispose d'une base de données journalières provenant des stations fonctionnelles de la DG-eau et de Météo-Bénin. A celles-ci s'ajoute le réseau AMMA-CATCH fonctionnel depuis plus de 20 ans avec une très bonne résolution temporelle (5 min). Avec ces données, le LMI REZOC a fourni des éléments de climatologie des précipitations et a permis de générer des courbes intensité-durée-fréquence couvrant pour la première fois les échelles de temps du journalier à l'infra-horaire.

Dans la seconde phase du LMI REZOC, on documentera la tendance de ces régimes de précipitation (T3L1) et on les traduira sous forme de courbes intensité-durée-fréquence (T3L2) dans une condition de non-stationnarité (Chagnaud *et al.*, 2021, 2022). Ces outils seront mis à disposition des partenaires non académiques (Météo Bénin, Ministère de l'Eau et des Mines, etc.) et des utilisateurs (Bureau d'étude hydraulique, etc.) pour leur intégration dans les prises de décisions (T3L3, T3L6). Cette action de transfert bénéficiera de l'expertise acquise sur la même

⁷ <https://rezoc.osug.fr/Actu-3>

⁸ Système d'Alerte Précoce

thématique mais en contexte sahélien, dans le cadre du projet Cycle de l'Eau et Changement Climatique au Sahel (CECC) financé par l'IRD et l'AFD.

b) Caractérisation de la distribution des gouttes de pluie (H. Koubeagbede, S. Moumouni)

Au cours de sa première phase, le LMI REZOC s'est doté d'un disdromètre fonctionnel depuis 2020. Il est actuellement installé au sein de l'Université Abomey-Calavi. Dans un premier temps un anémomètre sonique sera installé à proximité du disdromètre pour améliorer la modélisation des spectres de gouttes (Testik and Pei, 2017 ; Montero-Martinez and Garcia-Garcia, 2016). Il sera ensuite déplacé par étape, à une fréquence annuelle, vers le nord afin de caractériser la variabilité spatiale des spectres de gouttes en particulier en relation avec le type d'événement météorologique (T3L7). Ces données serviront à documenter la microphysique des précipitations (Moumouni et al, 2021 et 2023) et en déduire non seulement le pouvoir érosif des précipitations (Adjikpe *et al.*, 2021) (T3L8) mais aussi leur impact sur l'atténuation des signaux des réseaux de téléphonie mobile (Doumounia *et al.*, 2014). Elles serviront également à paramétrer les algorithmes d'estimation de la pluie à partir des mesures radar, utiles pour le système d'alerte précoce à l'inondation, en cas de disponibilité d'un radar météorologique (Koubeagbede *et al.*, 2017).

c) Analyse des tendances de crues des grands cours d'eau du Bénin et outils de prévision dans la vallée de l'Ouémé (E. Lawin, C. Peugeot)

La littérature fait état d'une recrudescence des événements d'inondation et des dommages associés dans le bassin de l'Ouémé. Or, à notre connaissance, il n'y a pas eu d'analyse à long terme sur les tendances de cet aléa hydrologique. Il s'agira pour la série de débits journaliers des fleuves Ouémé et Mono, d'analyser ces séries pluri-décennales afin de rechercher des tendances et de détecter les éventuelles ruptures (T3L4). On s'inspirera de la méthode mise en œuvre par Wilcox *et al.*, (2018), fondée sur la théorie des valeurs extrêmes instationnaires.

Quant à la prévision des crues, deux types d'outils ont été développés en lien avec le SAP Bénin dans la première phase du LMI REZOC, dans le cadre de la thèse de L. Sossou. Une approche statistique débit-débit permet, d'une part, d'estimer la probabilité de dépassement des seuils d'alerte à une station cible (ex. Bonou) et le débit maximal probable à l'échéance de 1 à 3 jours (Sossou *et al.*, In prep.). D'autre part, une approche pluie-débit basée sur les réseaux de neurones permet d'estimer le débit à la station cible à partir des produits temps réel de précipitation issus des missions satellitaires, à des échéances de prévisions plus lointaines (jusqu'à 5-10 jours). Les deux approches sont complémentaires. Elles sont peu gourmandes en ressources de calcul.

Dans la phase 2 du LMI REZOC, il est proposé de transformer ces outils "recherche" en outils opérationnels. Une première phase de concertation et de co-construction avec les utilisateurs finaux (SAP, Direction Générale de l'Eau, Sécurité civile) de définir les spécifications des outils opérationnels souhaités (T3L5). Ces spécifications seront ensuite déclinées sous forme de produit logiciel, puis testées et validées par les utilisateurs (T3L9). L'utilisation en mode opérationnel pourrait nécessiter l'équipement de stations hydrométriques ou pluviométriques en télétransmission, pour une meilleure fluidité de la circulation de la donnée nécessaire aux prévisions, et au suivi permanent des scores de prévision. Cela sera coordonné avec la stratégie de re-déploiement de stations du réseau AMMA-CATCH.

5. Chemins de l'eau dans la zone critique (O. Mamadou, J.-M. Cohard)

Le thème « chemins de l'eau dans la Zone Critique » vise à quantifier les flux d'eau et de ses isotopes stables, et de CO₂. Il vise également à quantifier les transferts entre compartiments et les temps de résidence dans la Zone Critique. Les observations réalisées pour cela permettront de mieux contraindre des modèles eco-hydrologiques de la ZC en particulier pour la zone soudanienne en Afrique de l'Ouest. Ces modèles ainsi évalués pourront être déployés dans le cadre des autres thèmes du LMI pour simuler l'impact des changements globaux sur le cycle de l'eau, en terme de chemins de l'eau et de temps de résidence.

a) Analyse multi-échelle de la variabilité spatiale et temporelle des flux de vapeur d'eau, de CO₂, et du bilan radiatif sur les écosystèmes béninois (O. Mamadou, J.-M. Cohard)

En climat soudanien, l'évapotranspiration est le flux qui recycle la plus grande partie (~2/3) des précipitations annuelles, suivi par le ruissellement et la recharge des nappes (Mamadou *et al.*, 2016 ; Hector *et al.*, 2018). Mamadou *et al.* (2016) ont montré que la dynamique temporelle de l'évapotranspiration était très liée à la phénologie des couverts végétaux, ceux-ci étant assez peu limités en eau. Les écosystèmes arbustifs et arborés, pérennes, sont dotés de systèmes racinaires profonds leur permettant d'accéder à la ressource y compris en saison sèche. Les cultures, utilisent quant à elles des ressources plus proches de la surface, essentiellement pendant la

saison humide. Ainsi les changements d'occupation des terres impactent directement les quantités d'eau évapotranspirées et ainsi l'ensemble du cycle de l'eau. Ces écosystèmes à base de ligneux ont par ailleurs une capacité de séquestration du CO₂ importante. Dans la région de Djougou, la forêt de Bellefoungou montre un NEE (Net Ecosystem Exchange) de $\sim 5660 \text{ kgC ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ et les zones de culture et de savane, un NEE de l'ordre de $2800 \text{ kgC ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ (Rahimi *et al.*, 2021). Pour quantifier les flux d'H₂O et de CO₂ entre la surface et l'atmosphère, nous nous appuyerons sur les séries longues de l'observatoire AMMA-CATCH couvrant la période 2008 – 2019, ainsi que les données obtenues sur le site de Dangbo (région de Porto-Novo) depuis 2022. Ces observations bénéficient d'ores et déjà d'un financement du PEPR FairCarboN sur la période 2023 – 2028. Au delà de leur valeur scientifique, ces résultats seront mis en forme et diffusés à différents niveaux dans les ministères concernées pour guider des stratégies d'aménagement du territoire et de leurs impacts sur les ressources en eau ou pour préciser des hypothèses de calcul (actuellement $4 \text{ tC ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour les forêts) pour déterminer les NDC (Nationally Determined Contributions). Les actions seront :

- de quantifier la dynamique et la variabilité temporelle (diurne, saisonnière, interannuelle) des flux d'eau et de CO₂ sur les principaux types d'écosystèmes au nord et au sud, à partir des données de l'observatoire AMMA-CATCH. Les jeux de données seront valorisés par un article orienté données (T4L1) ;
- d'estimer les bilans annuels de CO₂ sur les écosystèmes béninois à partir des données AMMA-CATCH. Une intercomparaison des deux approches de partition des flux de CO₂ (Reichstein *et al.*, 2007 ; Lasslop *et al.*, 2010) sera effectuée (T4L2). Cette action pourra s'appuyer sur les travaux de Hounssinou *et al.* 2022, 2023 ;
- la méthode de Reichstein utilisée pour le CO₂ n'a jamais été mise en œuvre pour les flux de H₂O. Cette action visera à identifier les drivers principaux pour ce flux et à modéliser la réponse à ces drivers. Ces relations permettront de compléter les séries de données pour établir des bilans annuels (T4L5) ;
- deux stations d'EddyCovariance financées par un projet OWSD (Organisation for Women in Science for the Developing World) ont récemment été installées au sud du Bénin, sur une palmeraie et sur une zone de culture. Ces stations constitueront des sites complémentaires de l'observatoire AMMA-CATCH, gérés en synergie avec le LMI. Dans le cadre du LMI il s'agira d'uniformiser l'instrumentation et les procédures d'analyse afin de répondre au mieux aux enjeux locaux et nationaux en terme de météorologie et de flux (T4L3) ;
- les processus de photosynthèse et la production électrique photovoltaïque sont sensibles à la partition du rayonnement solaire incident entre rayonnement direct et diffus. Les modèles de surface sol-végétation-atmosphère intègrent cette différenciation mais peu de sites en Afrique sont instrumentés pour renseigner cette partition. L'IRD finance (demande d'équipements spécifiques 2023 de l'IGE) huit stations sur l'ensemble de l'Afrique de l'ouest équipées de capteurs SPN1 et de caméra hémisphériques permettant la correction des mesures. Deux de ces capteurs seront installés au Bénin sur la station de Nalohou (AMMA-CATCH) et la station de Dangbo au sud. Des études de sensibilité du modèle de surface CLM à la partition direct/diffus seront menées pour évaluer son importance pour les écosystèmes béninois, en particulier au sud du pays où les nuages bas affectent cette partition diffus/direct.

b) Modélisation hydrologique des chemins de l'eau (B. Hector, M'Po N'Tcha)

Il s'agira ici de vérifier si les chemins de l'eau sont respectés quelques soient les modèles et la résolution des simulations. En particulier, en zone de socle, le fonctionnement des bas-fonds est essentiel pour la génération des écoulements (Hector *et al.*, 2018) et la capacité de reprise racinaire essentielle pour la partition entre évapotranspiration, recharge et écoulement (Herzog *et al.*, 2021). Des simulations Parflow-CLM sur des bassins versants de taille intermédiaires tel que l'Ara ($\sim 10\text{km}^2$) ou la Donga ($\sim 500\text{km}^2$) seront réalisées avec plusieurs résolutions différentes allant de 25m à 2km. Il s'agira de mettre en œuvre des stratégies permettant de respecter les temps de résidence dans le bassin, par exemple, par la recherche de perméabilité équivalente ou de distribution de ces perméabilités (T4L4). Cette stratégie a été initiée dans Herzog *et al.*, 2021 pour représenter le rôle sous maille des bas fond de têtes de bassin, bien que la résolution du modèle ne permettait pas de les représenter explicitement. Pour ces stratégies, la cartographie des bas-fonds réalisée en (2.d) sera utilisée. De même, en zone sédimentaire, il s'agira de s'assurer que les simulations réalisées dans le cadre du thème ressource en eau souterraine dans les aquifères côtiers (thème 1) respectent les temps de résidence observés par mesures isotopiques (5.c).

Des simulations de suivi de particules (ECOSLIM, Maxwell *et al.* 2019) seront systématiquement réalisées à partir des champs de vitesse simulés par Parflow-CLM pour estimer les temps de résidence pour les eaux reprise par la végétation et les eaux séjournant dans les aquifères profonds (T4L6).

c) Apport des traceurs isotopiques pour la compréhension, la quantification, et la modélisation des chemins de l'eau (V. Kotchoni, C. Vallet-Coulomb)

L'intégration des traceurs environnementaux dans les modèles hydrologiques de surface (e.g. Birkel et al., 2015 ; Douinot et al., 2019 ; Kuppel et al., 2020) et dans les modèles d'écoulement souterrain (Séraphin et al., 2016) apporte des contraintes précieuses pour leur calibration. Ils permettent de mieux représenter les processus en jeu et de valider la simulation des flux et des temps de résidence dans les différents compartiments du cycle de l'eau. A ce jour, cette démarche modèle-données a très peu été déployée dans la bande intertropicale, et jamais en Afrique. Dans le cadre du LMI, les isotopes stables de la molécule d'eau seront utilisés pour améliorer les modèles déployés, à la fois le modèle d'écoulement souterrain dans les aquifères sédimentaires du sud (voir section 2a), et dans la modélisation éco-hydrologique de la zone de socle, au centre du pays (voir section 3c).

Dans les bassins sédimentaires côtiers, les interactions entre l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada et les réservoirs de surface sont encore très mal quantifiés ce qui entraîne de grosses incertitudes pour le modèle de gestion de l'aquifère (Thème 1). Des données isotopiques récentes ont permis de mieux contraindre les interactions à l'Est, au Nord-Est et au Nord-Ouest du plateau. En revanche, au Sud et au Sud-Ouest, les transferts vers l'Océan et le lac Ahémé n'ont jamais été quantifiés, malgré des données préliminaires suggérant une signature évaporée des eaux souterraines (Alassane et al. 2018). Nous proposons pour la deuxième phase du LMI de réaliser des mesures des isotopes stables de l'eau et de tritium afin de (i) mieux comprendre les processus de recharge, (ii) révéler les interactions entre les eaux souterraines et de surface, et notamment les contributions de l'aquifère aux hydrosystèmes de surface (T4L7) et (iii) mieux cerner le phénomène d'intrusion saline dans l'aquifère. Nous nous appuyons sur le spectromètre laser de l'INE installé au Laboratoire d'Hydrologie Appliquée pour faire les analyses au Bénin. Un plan d'échantillonnage des eaux souterraines, de surface et de la pluie sera élaboré suivant une périodicité adaptée à la saisonnalité hydrologique (~mensuelle). Pour cibler les échantillonnages, des transects de conductivité seront effectués sur le lac Ahémé, afin d'identifier les zones de mélange. Les résultats obtenus serviront à consolider le modèle d'écoulements souterrains développé à la section 2a (T1L1).

Dans la zone de socle, un suivi isotopique ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ^{17}O -excess) a été initié en 2018 dans le cadre de l'ANR HUMI-17 et poursuivi avec le soutien des projets EC2CO TranZCTropic et ANR PAST-17 sur le bassin versant de l'Ouémé supérieur (composition isotopique des pluies à la station Nalohou au pas de temps quasi-événementiel, et de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou, ainsi que des données sur les eaux de nappe et de sol). Cette base de données pluriannuelle, unique sur le continent africain, représente une opportunité inédite pour déployer une approche de modélisation hydro-isotopique.

Une démarche de modélisation couplée intégrant bilan d'énergie, transferts d'eau, dynamique de la végétation et suivi de traceurs (modèle ECH₂O-iso, Kuppel et al 2018) est actuellement engagée dans le cadre de la thèse de Diego Chavez-Espinoza (CEREGE, en collaboration avec le GET, HSM et l'IGE) sur le bassin versant de l'Ouémé supérieur. Elle se poursuivra dans le cadre du LMI pour évaluer les différentes informations portées par les traceurs isotopiques dans ce contexte. On cherchera à tracer l'influence des processus d'évapotranspiration pour la vidange saisonnière des nappes (T4L8) et l'importance des transferts latéraux de subsurface pour la génération des écoulements en rivière à différentes échelles. La base de données isotopique acquise, combinée à des tests de sensibilité réalisés avec le modèle, fournira un cadre permettant d'affiner les stratégies d'échantillonnages (localisation, résolutions spatiales et temporelles) qui soient soutenables au niveau logistique pour les échelles spatiales considérées. Une stratégie long terme sera mise en place pour détecter les variations progressives ou abruptes du cycle de l'eau régional. Le suivi isotopique mis en place sur l'Ouémé et les précipitations à la station Nalohou sera ainsi poursuivi.

6. Formation et Valorisation (J. Hounkpe & J-P. Vandervaere)

Le LMI REZOC a été très mobilisé pour la formation au cours de sa première phase, notamment par l'organisation de l'école de terrain et par la participation à des cours doctoraux mis en place dans le cadre du Centre d'Excellence Africain pour l'Eau et l'Assainissement (CEA C2EA) ou encore des formations au calcul haute performance dans le cadre du Centre d'Excellence Africain Sciences Mathématique et Informatique Appliquées (CEA SMIA). Par ailleurs, plusieurs formations ont été organisées avec les acteurs du domaine de l'eau, notamment la DG-Eau, pour la gestion des eaux souterraines et le suivi des eaux de surface (tarage, critique de données). Ces transferts de connaissances et la valorisation des résultats scientifiques auprès des décideurs seront généralisées pour le

prochain exercice du LMI REZOC. Tous les thèmes scientifiques du LMI sont associés à des actions de valorisation spécifique. Il s'agira ici de mieux faire valoir ces actions.

a) Formation (Y. M'Po N'tcha & J-P. Vandervaere)

- Ecole de Terrain Intégratrice des Savoirs

Depuis 2021, l'Ecole de Terrain (ET) dite "Intégratrice des Savoirs" est co-organisée et co-financée par le LMI REZOC et le CEA C2EA, en coordination avec les quatre Départements de l'Institut National de l'Eau (INE/UAC). Depuis la troisième édition de 2023, elle entre pleinement dans le programme des quatre Masters de l'INE et est ainsi devenue obligatoire pour tous les étudiants de l'INE (plus de 80).

S'appuyant sur REZOC-2, l'ET pourra monter en puissance sur deux plans : (i) extension régionale de l'offre aux étudiants de master des pays partenaires (Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Niger) et (ii) professionnalisation avec des phases pré- et post-terrain renforcées, notamment par des capsules vidéo et des ateliers de restitution mettant mieux en avant les compétences acquises par les étudiants (T5L1).

- Renforcement de l'offre de cours doctoraux et de Master

A la demande de l'INE, les enseignants du Nord seront soutenus pour leurs interventions sur des cours spécifiques au niveau Master ou doctoral. Il ne s'agit pas de remplacer les enseignants de l'INE mais d'apporter des compléments ciblés ayant vocation, à terme, à faire évoluer les compétences des étudiants et des doctorants afin de mieux les préparer au marché de l'emploi dans le secteur privé ou académique. En particulier, une initiation à la modélisation hydrologique intégrée sera proposée à l'INE, ainsi qu'un module autour du nexus eau/énergie (T5L2).

D'autre part, l'INE a acquis des compétences fortes sur les outils géophysiques au service des problématiques de ressources en eau. Le LMI devrait contribuer au montage d'une Formation Courte Durée, théorique et pratique, ouverte (T5L2) aussi bien aux professionnels sectoriels qu'aux enseignants-chercheurs de la sous-région.

- Formation vers les scolaires au Bénin et en France du premier cycle au lycée

La sensibilisation aux ressources en eau peut commencer dès le plus jeune âge. Une action spécifique visera à constituer des kits pédagogiques à faible coût (T5L4) qui puissent être répliqués au Bénin et en France, pour sensibiliser les publics scolaires aux enjeux de la ressource en eau (par exemple un modèle réduit du système plateaux d'Allada, de Sakete et delta de l'Ouémé, une activité ludique sur les barrages). Ces activités seront également déclinées dans les écoles normales qui forment les futurs enseignants du secondaire et du primaire. Un accompagnement des enseignants du secondaire pour la mise en œuvre des kits dans les classes sera proposé, via l'UNSTIM.

b) Valorisation (J. Hounkpe & J-P. Vandervaere)

- Création de Journées de la Valorisation et de la Diffusion (JVD)

On se propose de mettre sur pieds les Journées bisannuelles de la Valorisation et de la Diffusion (JVD), réunissant enseignants, professionnels du secteur et étudiants afin de mieux communiquer sur les résultats de recherche académique ayant un potentiel d'utilisation dans l'opérationnel (T5L3). D'autres financeurs pourront être recherchés en appui pour rendre ces JVD possibles (IRD ou Banque Mondiale notamment). Elles seront organisées dès mai ou juin 2024 (selon la disponibilité des partenaires) pour compléter l'atelier de co-construction organisé en mars 2022 qui a permis l'émergence des actions autour de la gestion des barrages multi-usages. Deux autres JVD seront organisées en 2026 et 2028 en phase avec les ateliers de restitution du LMI pour faire un état des lieux des nouveaux résultats scientifiques et de leur déclinaison opérationnelle.

- Communication sur les résultats de recherche

Le bilan de la première phase du LMI montre qu'il est nécessaire de mieux communiquer sur les résultats de REZOC, d'une part auprès des institutions béninoises et plus largement dans la sous-région, mais aussi auprès des bailleurs internationaux tels que l'AFD, la Banque Mondiale ou l'UNESCO, ou encore dans le cadre des grandes réunions internationales tel que le Forum Mondial de l'Eau. Plusieurs initiatives seront prises, notamment en invitant aux JVD des acteurs d'autres pays de la sous-région, en participant avec l'IRD aux événements organisés lors du Forum Mondial de l'Eau. Le maintien à jour régulier du site internet du LMI (<https://rezoc.osug.fr/>) assurera une bonne visibilité de ses activités et leur relai vers les médias en Afrique et en

Europe. Une plaquette résumant les résultats et leur valorisation scientifique ou opérationnelle (T5L5) sera éditée en milieu d'exercice.

4. Projet scientifique et problématiques de développement : articulation, équilibre entre développement des connaissances et perspectives d'impact sociétal

Le projet du LMI REZOC présenté ci-dessus est dicté par les enjeux sociétaux que ce soit pour les liens sciences/société ou le renforcement de capacités. Les trois premiers thèmes ont été construits avec une question posée par les acteurs/opérateurs que ce soit pour des aspects ressources en eau, risques ou adaptation au changement climatique. Le dernier est plus méthodologique. Pour chacun des thèmes, les livrables sont à la fois scientifiques et opérationnels. Les livrables opérationnels répondent pour la plupart à des demandes des opérateurs de la ressource en eau. A titre d'exemple, on peut citer :

- Le modèle d'aquifère du plateau d'Allada a été conçu dans le cadre des projets OMIDELTA et AGIRES financé par la coopération néerlandaise. Sur demande du bailleur, ces projets ont été co-construits en amont avec l'ensemble des partenaires en intelligence collective grâce au fond d'amorçage de l'IRD (projet CINERGIRE 2017). Ce modèle sera directement utilisé par les gestionnaires opérationnels (T1L1).

- La gestion soutenable des futurs barrages multi-usages sur le fleuve Ouémé est une problématique largement partagée par les acteurs du domaine de l'eau (Ministères, DG-Eau, Syndicats agricoles, Hydrologues). Le LMI REZOC s'en est saisi suite à l'atelier organisé en mars 2022 à Cotonou, qui a fait ressortir ce thème très sensible. Les travaux du LMI seront régulièrement présentés à tous les acteurs et permettront de proposer des outils d'aide à la décision (livrables T2L6, T2L7).

- L'adaptation à des régimes climatiques plus extrêmes nécessite la mise en place d'outils directement issus de la recherche comme les courbes intensité-durée-fréquence permettant de connaître les périodes de retour d'événements pluvieux extrêmes nécessaires à la construction des ouvrages tel que les ponts, les digues, etc. Un outil à destination des décideurs est en cours de développement dans le cadre du projet CECC (AFD/IRD). Dans le cadre du LMI, une formation des opérateurs béninois à l'utilisation de ces outils sera proposée.

- La prévention des inondations reste une préoccupation majeure et une prérogative de la DG-Eau, via le SAP, partenaire de l'IRD depuis plus de 30 ans. Les développements en cours basés sur l'Intelligence Artificielle, concertés avec le SAP, permettront une gestion opérationnelle de l'alerte de crue (livrables T3L6, T3L9).

- Le LMI continuera de contribuer de manière significative au renforcement de capacités à travers des actions de formation, à la fois dans le cadre d'ateliers de terrain initiés par le LMI, désormais intégrés dans tous les cursus de Master de l'INE et par l'encadrement de stagiaires de Master et de doctorant.e.s. Plusieurs thèses co-encadrées Nord-Sud financées par l'IRD ou par l'INE (projet OMIDELTA, Centre d'excellence C2EA) seront soutenues à partir de 2024.

- Les actions plus orientées recherche, en particulier dans le thème « Chemins de l'eau dans la zone critique », permettront de décliner les outils développés à destination des opérationnels. C'est le cas de l'isotopie dont les livrables sont plutôt orientés recherche mais dont les résultats permettront de mieux contraindre les modèles d'aquifère proposés dans le thème « Ressources en eau souterraine dans les bassins sédimentaires côtiers ». La caractérisation des échanges surfaces atmosphère d'H₂O et de CO₂ permettra d'évaluer des modèles de zone critique qui seront utilisés pour simuler l'impact de scénarii d'occupation du sol sur les ressources et les chemins de l'eau et sur la séquestration du CO₂. Ces résultats pourront être utilisés comme outil d'aide à la décision (livrable T4L2).

Les JVD (Journées de la Valorisation et de la Diffusion, § 3b) permettront d'évaluer l'adéquation des outils développés dans le cadre du LMI et de construire des pistes d'amélioration avec l'ensemble des acteurs. Les membres du LMI n'ayant pas vocation à se substituer aux opérateurs ou aux bureaux d'étude du domaine, ils pourront toutefois se saisir de certaines questions posées lors des JVD et les décliner en nouvelles questions scientifiques qu'ils pourront traiter. Lors de ces JVD, le positionnement du LMI devra être extrêmement clair sur son rôle scientifique en support au développement et en aucun cas en concurrence avec d'autres opérateurs (livrable T5L3).

5. Présentation du partenariat et de la gouvernance

Le LMI est fondé sur quatre partenaires principaux (INE, UNSTIM, IGE et HSM, Figure 5) qui collaborent depuis 2000. En plus de ces quatre laboratoires qui représentent les deux tiers des ETPs, le LMI s'associera avec des partenaires en raison de la complémentarité de leurs expériences. L'étude de la zone critique est par nature pluridisciplinaire. Il est apparu évident au cours du précédent exercice que plusieurs Départements de l'Université Abomey-Calavi (UAC) et plusieurs laboratoires béninois et français devaient être associés. Ainsi l'Institut de Mathématique et de Sciences Physiques (IMSP, Dangbo), le Laboratoire de Physique Appliquée et le Département de Géographie de l'UAC seront officiellement associés au LMI. L'université Nationale d'Agriculture (UNA) et l'Ecole Normale Supérieure de Natitingou sous tutelle de Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématique (UNSTIM) seront associés. Ainsi, pour des actions spécifiques, en lien avec l'agriculture ou en lien avec la formation des enseignants, le LMI pourra s'appuyer sur ces partenaires pour mieux diffuser les résultats scientifiques. En France les UMR CEREGE, le GET et PACTE seront associées au LMI. Les compétences apportées en géochimie et en géographie viendront utilement renforcer l'équipe de la première phase pour combler les manques identifiés lors de l'évaluation intermédiaire du LMI REZOC. Chacun(e) de ces laboratoires/universités est impliqué(e) dans l'animation du LMI. Les partenaires sont décrits en annexe.

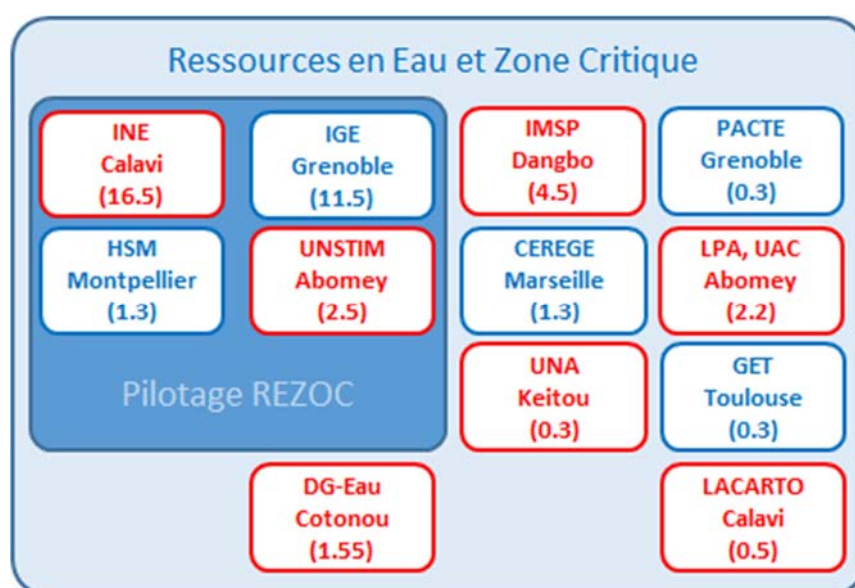


Figure 1. Le LMI REZOC est formé de quatre partenaires principaux et de partenaires associés pour l'étude de la zone critique au Bénin.

Le total des ETP de chaque partenaire est indiqué entre parenthèses. Les laboratoires du Sud figurent en rouge.

Le LMI est co-dirigé par E. Lawin (INE), J.-M. Cohard (IGE), S. Moumouni (UNSTIM) et C. Peugeot (HSM). Il fonctionne autour de quatre thèmes qui rassemblent chacun des questions scientifiques et des questions sociétales et une cellule transversale « formation et valorisation » (Figure 6). Le Comité de Direction du LMI est composé d'un responsable de chaque thème (voir description des missions ci-dessous). Chacun des partenaires du LMI a un correspondant désigné.

Direction: la direction est en charge de la réflexion prospective, de la communication interne et externe, de la visibilité des données, du secrétariat scientifique et de l'arbitrage budgétaire. Elle assure les relations avec les tutelles et l'environnement programmatique utile pour les objectifs du LMI. Elle est assistée d'un comité de direction.

Comité de direction (CoDir): le comité de direction est composé de la Direction et de cinq animateurs de thème. Il se réunit tous les deux mois par visioconférence pour le suivi opérationnel du LMI. Il lance les appels d'offre annuels, propose un arbitrage à la direction et en assure le suivi. Il organise la réunion annuelle du LMI.

Animateurs de thème recherche/action: chaque thème est animé par un binôme. Ils animent les actions de recherche, veillent à leur visibilité internationale et pilotent la cohérence inter-thème. Ils présentent les travaux et les projets du thème aux bailleurs internationaux et effectuent une veille sur les appels d'offre. Ils veillent au lien avec les actions de formation et de valorisation. Les animateurs choisissent celui qui représentera leur axe dans le Co-Dir.

Animateurs de l'axe formation et valorisation : ils sont en contact avec les responsables de formations nationales et internationales existantes et avec les directions opérationnelles. Ils veillent au suivi des objectifs de formation et de valorisation du LMI. Ils veillent au lien avec les axes de recherche. Ils choisissent celui qui représentera leur axe au Co-Dir.

Correspondants des laboratoires ou institutions : ils diffusent l'information auprès de leur direction. Ils établissent et mettent à jour les ETP des membres de leurs laboratoires. Ils proposent au CoDir l'insertion de nouveaux membres, en fonction de leurs compétences et de leur disponibilité.

Comité d'Ethique Science/Société du LMI (CoESS) : il sera mis en place en 2024. Composé de représentants des laboratoires participants ainsi que de personnalités de la société civile choisies conjointement. Ce comité s'attachera à évaluer/étudier la dynamique des actions de co-construction et le positionnement des différents acteurs afin de guider le LMI dans ses actions de valorisation.

Animation Science/société : A la suite de la première phase, le LMI organisera une fois par an des journées pour présenter les avancées en termes de recherche et de formation. En année 1, 3 et 5 des ateliers seront organisés conjointement avec les acteurs (JVD) pour co-construire le cahier des charges des outils transmis (an. 1) et assurer le transfert opérationnel (an. 3 et 5). En dehors de ces réunions annuelles, les membres du LMI se réunissent régulièrement, en visioconférence ou en présentiel, suivant les besoins des thèmes. Des séminaires scientifiques sont régulièrement proposés en introduction au CoDir.

Communication interne et externe : le LMI communique via ses listes de diffusion à différents niveaux (tous, CoDir, Comité scientifique, correspondants labo, etc.) avec le serveur de liste IRD. Le site web REZOC⁹ permet d'assurer la diffusion de l'actualité du LMI. Un intranet permet d'archiver les documents officiels et les compte rendus des événements organisés par le LMI. Des actions spécifiques seront menées par la cellule Formation et Valorisation vers différents publics (scolaires, universités, acteurs) avec différents médias.

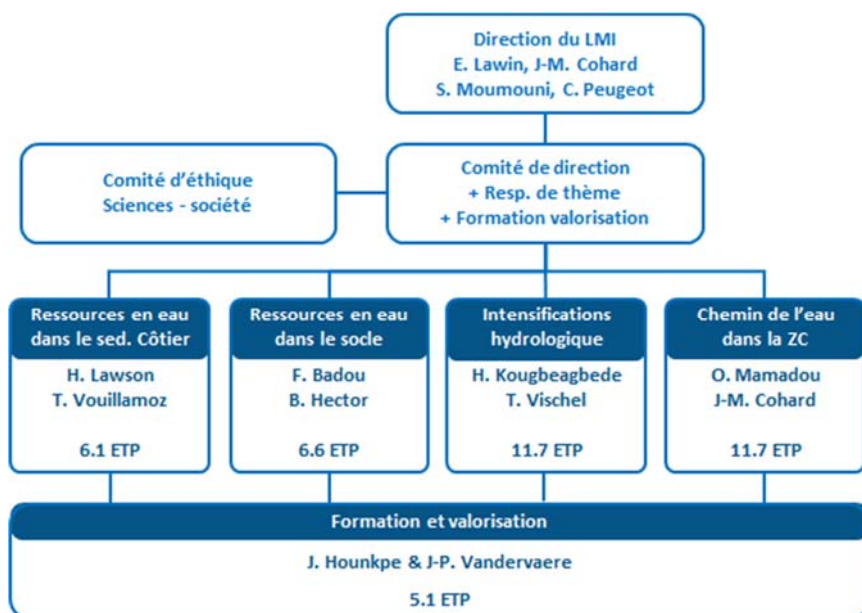


Figure 6. Organigramme du LMI avec les responsables de chaque thème et de la cellule Formation et valorisation. Les membres du LMI sont listés par axe, les personnels permanents en bleu et les non permanents en noir.

6. Plus-value d'une deuxième phase et perspectives à plus long terme

La première phase du LMI a permis de structurer le partenariat autour de projets prometteurs, autant en terme de résultats scientifiques que de transferts vers les acteurs du domaine de l'eau au Bénin. L'organisation en axes lors du précédent exercice a permis une large ouverture qui a permis de formaliser des collaborations avec l'INE mais aussi avec des enseignants/chercheurs d'autres départements de l'UAC ou d'autres universités. Dans sa deuxième phase le LMI REZOC a pris acte de cet élargissement. Les projets ont mûri grâce à des co-portages et à des soutiens bilatéraux qui ont permis l'émergence de projets d'envergure tel que les projets OMIDELTA et AGIRES, financés par la coopération néerlandaise, mais aussi les Centres d'Excellence SMIA et C2EA soutenus officiellement par l'IRD. Ces projets ont permis le financement de thèses co-encadrées qui ont renforcé les collaborations. La deuxième phase du LMI permettra de consolider les résultats scientifiques autour de ces projets, en particulier d'étendre les modèles hydrogéologiques conçus pour le plateau d'Allada à l'ensemble des aquifères des bassins sédimentaires côtiers du Bénin (deux thèses en cours), mais aussi de permettre le transfert de ces résultats vers les acteurs du domaine de l'eau. L'enjeu est toutefois de trouver une légitimité auprès de ces acteurs,

⁹ <https://rezoc.osug.fr/>

qui ne voient pas toujours le potentiel offert par le monde académique pour les accompagner dans leurs missions. Dans cette deuxième phase, la cellule Formation et Valorisation est pensée pour aplanir ces barrières avec l'ensemble des membres du LMI volontaires pour cela.

Plusieurs actions de modélisation hydrologique ont été engagées dans la première phase, avec l'ambition de promouvoir les approches de modélisation intégrée de la Zone Critique au Bénin, en particulier en portant le modèle Parflow CLM sur le centre de calcul de l'IMSP (serveur Asuka). Là encore, cela reste à consolider à la fois en formant de jeunes docteurs au calcul haute performance mais aussi en rendant opérationnel l'accès au serveur Asuka pour ces simulations. Des changements de personnels et des retards de livraison du serveur ont reporté cette opérationnalisation, qui sera réalisée dans la deuxième phase du LMI. Cela permettra de réaliser les simulations prévues (parties 2.c, 3.c, 5.b ci-dessus), et d'apporter les moyens attendus pour trois thèses en cours. La mise en place d'un laboratoire isotopique à l'INE ouvre de nouvelles perspectives pour développer l'usage des traceurs isotopiques, en particulier pour identifier les chemins de l'eau et quantifier les temps de résidence dans les différents compartiments hydrologiques. Ces analyses permettront de consolider les hypothèses de fonctionnement hydrologique et par la suite réduire les incertitudes dans les modèles de gestion.

Enfin, l'observatoire AMMA-CATCH a été dimensionné à l'origine dans une logique régionale (trois sites de meso-échelle le long du gradient climatique Ouest Africain). Cela ne répond que partiellement aux questions sociétales du territoire béninois. Dans le cadre des actions scientifiques du LMI, il est devenu incontournable de mieux co-localiser les sites d'observation AMMA-CATCH avec les enjeux hydro-météorologiques du territoire béninois. A coût constant pour l'observatoire, nous nous attacherons dans le cadre de la deuxième phase du LMI à déplacer quelques stations pluviométriques et limnimétriques, en particulier vers le Sud du pays. Ces modifications de réseau ne devront toutefois pas mettre en péril l'observation long terme de l'Ouémé supérieur où les stations AMMA-CATCH sont aujourd'hui concentrées. Par ailleurs l'ouverture d'un site complémentaire au sud, incluant une station d'Eddy Covariance pour la mesure des flux H₂O et CO₂, portés par les chercheurs béninois, permettra un meilleur partage des atouts et des données de l'ensemble du dispositif AMMA-CATCH au Bénin. L'adossement renforcé à l'observatoire AMMA-CATCH est un atout pour le LMI, grâce au soutien pérenne des tutelles de l'observatoire, via sa labellisation SNO-France. Cela constituera une première pierre pour la pérennité de l'édifice partenarial issue du LMI REZOC.

7. Ambition régionale et internationale .

Le LMI REZOC est au cœur des enjeux d'accès à l'eau en Afrique de l'Ouest qui, malgré les investissements importants des dernières décennies, reste encore un défi du fait de l'augmentation démographique. L'ambition du LMI est de se positionner comme un acteur scientifique reconnu en Afrique de l'Ouest, autant dans le monde académique que pour les acteurs locaux et les acteurs du développement. Les actions menées au cours de la deuxième phase donneront des exemples concrets de l'apport d'une science hydrologique novatrice (modélisation hydrologique intégrée, intelligence artificielle, prospection géophysique multi-outils, isotopie), co-construite avec les acteurs, au bénéfice du monde non académique. Ces exemples seront le point de départ pour disséminer les approches et les expertises du LMI dans la sous région. Plusieurs initiatives structurent d'ores et déjà l'envergure régionale du LMI REZOC. La première d'entre elle est l'observatoire AMMA-CATCH, par construction régionale et plateforme d'appui pour le LMI. Les membres de la direction du LMI REZOC sont aussi associés à la direction de l'observatoire et si le LMI dans sa phase 2 reste centré sur des cas d'étude du territoire béninois, l'objectif de régionalisation à travers AMMA-CATCH reste entier dans notre esprit. Plusieurs thèses sont engagées dans ce sens, co-encadrées par les membres du LMI qui concernent le territoire nigérien ou sénégalais (A.W. Halidou Mounkaila, M. Tabsoba, L. Rapp, M. P. Degbe).

Le Centre d'Excellence Africain C2EA est à la fois un appui pour l'INE et ses partenaires (plusieurs thèses financées par le C2EA co-portées par des membres nord et sud du LMI), mais aussi un outil de rayonnement international en particulier dans la sous région. Ce rayonnement est orchestré à la fois en interne par le C2EA à travers des thèses co-encadrées avec des collègues d'autre pays Ouest Africain (Sénégal, Niger, Cameroun, etc.), mais aussi au travers de ACE Partner qui incarne la participation AFD/IRD au financement des Centres d'Excellence Africain via la mise en réseau des différents ACE (African Center of Excellence).

Par ailleurs, les membres du LMI sont très engagés dans le projet Cycle de l'Eau et Changement Climatique au Sahel (CECC) financé par l'AFD et l'IRD. Une synergie entre ce projet et les actions du LMI est déjà en place à

travers la caractérisation des extrêmes pluviométriques et leur déclinaison pour un usage opérationnel, la constitution de scénario d'occupation des terres et la modélisation hydrologique intégrée hyper-résolue.

Plusieurs LMI sont actifs en Afrique de l'Ouest, avec une ambition régionale. Il y a donc naturellement des liens entre ces structures qui permettent aussi de partager des visions, des actions et ainsi de coordonner des ambitions régionales. A titre d'exemple, le déploiement de capteur d'irradiation solaire diffus/direct sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest s'appuie sur les LMI NEXUS, DYCOFAC, AVENIR Sahel et REZOC.

Les projets de réseaux internationaux IRN viennent naturellement s'appuyer sur ce tissu de LMIs. En particulier, le projet ASAO (Aquifères de Socle en Afrique de l'Ouest), en cours d'évaluation, vise à fédérer les équipes de recherche et les opérateurs de la gestion des eaux souterraines dans ces régions géologiques. Ces opérateurs sont tous confrontés à des problématiques similaires : recherche de sites de forage à gros volumes et pérennité de ces forages. Le thème 3 du LMI REZOC contribuera directement à ce projet d'IRN à travers des actions concertées et le partage d'expertises dans plusieurs pays de la sous-région.

L'IGE porte un projet de modélisation hydrologique intégrée hyper-résolue à l'échelle régionale (Afrique de l'Ouest à la résolution de 1 km). Les actions du LMI REZOC contribuent directement à ce projet de même que le projet CECC pour la partie Sahel. Ce projet est également en collaboration avec l'Univ. de Princeton et l'Univ. d'Arizona. Plus généralement, les développements des modèles Parflow/CLM ou EcH2O sont coordonnés à l'échelle internationale ce qui permet de faire rayonner les recherches développées dans le cadre du LMI au-delà du contexte régional.

Enfin, dans le cadre de la structuration des compétences scientifiques de l'IRD, les thématiques du LMI REZOC sont au cœur du défi transversal « Eau comme bien commun ». Le LMI REZOC contribuera activement à ce thème transverse en apportant des connaissances sur la gestion de l'eau en Afrique de l'Ouest pour subvenir aux besoins fondamentaux des populations, mais aussi prévenir des aléas hydro-climatiques dans un contexte non stationnaire. Par ailleurs des actions auprès des acteurs internationaux pour le développement, en particulier dans le cadre du Forum mondial de l'Eau sont en préparation. Le LMI REZOC s'engage à participer à ces démarches.

7. Référence citées

- AfricaRice (2010) : Rapport de l'atelier final de la phase 1 (2009-2010) du projet RAP : Réalisation du potentiel agricole des zones des bas-fonds en Afrique sub-saharienne tout en maintenant leurs services environnementaux, 72p.
- Ago, E. E., Petit, F., and Ozer, P.: Analyse des inondations en aval du barrage de Nangbeto sur le fleuve Mono (Togo et au Bénin)., Analysis of flood downstream from the Nangbeto dam on the Mono River (Togo and Benin), 29, 2005.
- Adjikpe Loïc Saturnin, Moumouni Sounmaïla, Kougbegbede Hilaire, Massou Siaka « Potentiel érosif de la pluie : Identification du meilleur estimateur d'énergie cinétique de la pluie à partir des données de Drop Size distribution (DSD) de pluies mesurées au Nord-ouest du Bénin » Journal de Physique de la SOAPHYS, Vol 2, N°2 (2021): C20A17 :1-5, <http://dx.doi.org/10.46411/jpsoaphys.2020.02.17>
- Alassane A. (2018) Apport des outils géochimiques et isopiques pour l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement du système aquifère du Continental Terminal dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Thèse de doctorat, Université Abomey-Calavi, Bénin. 147pp.
- Amoussou E., Totin Vodounon S.H., Kouadio K.C.A., Obahoundje S., Kouame Y.M., Diedhiou Arona, Mahé Gil, Houndenou C., Boko M. (2020). Etude comparative du fonctionnement hydrologique dans deux bassins versants anthropisés en Afrique de l'Ouest. In : Bonnardot V. (ed.), Quenol H. (ed.). Changement climatique et territoires. Rennes : LETG, p. 61-66. Changement Climatique et Territoires : Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 33., Rennes (FRA), 2020/07/01-04. ISBN 978-2-907696-26-5.
- Badou, Djigbo Félicien, Bernd Diekkrüger, Evison Kapangaziwiri, Mamadou L. Mbaye, Yacouba Yira, Emmanuel A. Lawin, Ganiyu T. Oyerinde, et Abel Afouda. « Modelling blue and green water availability under climate change in the Beninese Basin of the Niger River Basin, West Africa ». Hydrological Processes 32, no 16 (30 juillet 2018): 2526 42. <https://doi.org/10.1002/hyp.13153>.
- Birkel, C., Soulsby, C., 2015. Advancing tracer-aided rainfall-runoff modelling: a review of progress, problems and unrealised potential. Hydrol. Process. 29, 5227–5240. <https://doi.org/10.1002/hyp.10594>
- Bossa, Y. A. (2012) Multi-scale modeling of sediment and nutrient flow dynamics in the Ouémé catchment (Benin) – towards an assessment of global change effects on soil degradation and water quality. Published PhD thesis., Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Germany. <https://bonndoc.ulb.uni-bonn.de/xmlui/handle/20.500.11811/5386>
- Boukari, Issoufou Ousmane, Yahaya Nazoumou, Guillaume Favreau, Maman Sani Abdou Babaye, Rabilou Abdou Mahaman, Marie Boucher, Ibrahim Issoufa, et al. « Changes in aquifer properties along a seasonal river channel of the Niger Basin: Identifying groundwater recharge pathways in a dryland environment ». Journal of African Earth Sciences 197 (1 janvier 2023): 104742. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104742>.
- Chagnaud, Guillaume, Jeremy Panthou, Théo Vischel, Juliette Blanchet, et Thierry Lebel. « A unified statistical framework for detecting trends in multi-timescale precipitation extremes: application to non-stationary intensity-duration-frequency curves ». Theoretical and Applied Climatology 145, no 1 (1 juillet 2021): 839 60. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03650-9>.
- Chagnaud, G., G. Panthou, T. Vischel, et T. Lebel. « A synthetic view of rainfall intensification in the West African Sahel ». Environmental Research Letters 17, no 4 (9 mars 2022): 044005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4a9c>.
- Chagnaud, G., G. Panthou, T. Vischel, et T. Lebel. « Capturing and Attributing the Rainfall Regime Intensification in the West African Sahel with CMIP6 Models ». Journal of Climate 36, no 6 (15 mars 2023): 1823 43. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0412.1>.
- Côte F.-X., Poirier-Magona E., Perret S., Roudier P., Rapidel B., Thirion, M.-C. (2019). La transition agro-écologique des agricultures du Sud. Éditions Quae.
- Cuthbert, Mark O., Richard G. Taylor, Guillaume Favreau, Martin C. Todd, Mohammad Shamsudduha, Karen G. Villholth, Alan M. MacDonald, et al. « Observed controls on resilience of groundwater to climate variability in sub-Saharan Africa ». Nature 572, no 7768 (1 août 2019): 230 34. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1441-7>.
- Defrance, Dimitri, Benjamin Sultan, Mathieu Castets, Moïse Famien, et Christian Baron. « Impact of Climate Change in West Africa on Cereal Production Per Capita in 2050 ». Sustainability 12 (14 septembre 2020): 7585. .
- Douinot, A., Tetzlaff, D., Maneta, M., Kuppel, S., Schulte-Bisping, H., and Soulsby, C.: Ecohydrological modelling with Ech2O-iso to quantify forest and grassland effects on water partitioning and flux ages, Hydrological Processes, 33, 2174–2191, <https://doi.org/10.1002/hyp.13480>, 2019.

- Doumounia, Ali, Marielle Gosset, Frederic Cazenave, Modeste Kacou, et François Zougmore. « Rainfall monitoring based on microwave links from cellular telecommunication networks: First results from a West African test bed ». *Geophysical Research Letters* 41, n° 16 (28 août 2014): 6016-22. <https://doi.org/10.1002/2014GL060724>.
- Fovet, Ophelie, Axel Belemtougri, Laurie Boithias, Isabelle Braud, Jean-Baptiste Charlier, Marylise Cottet, Kevin Daudin, et al. « Intermittent rivers and ephemeral streams: Perspectives for critical zone science and research on socio-ecosystems ». *WIREs Water* 8, no 4 (1 juillet 2021): e1523. <https://doi.org/10.1002/wat2.1523>.
- Galle, S., M. Grippa, C. Peugeot, I. Bouzou Moussa, B. Cappelaere, J. Demarty, E. Mougin, et al. « AMMA-CATCH, a Critical Zone Observatory in West Africa Monitoring a Region in Transition ». *Vadose Zone Journal* 17, no 1 (2018). <https://doi.org/10.2136/vzj2018.03.0062>.
- Hector, B., J. M. Cohard, L. Séguis, S. Galle, et C. Peugeot. « Hydrological functioning of western African inland valleys explored with a critical zone model ». *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, no 11 (2018): 5867-88. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5867-2018>.
- Herzog, Amelie, Basile Hector, Jean-Martial Cohard, Jean-Michel Vouillamoz, Fabrice Messan Amene Lawson, Christophe Peugeot, et Inge de Graaf. « A parametric sensitivity analysis for prioritizing regolith knowledge needs for modeling water transfers in the West African critical zone ». *Vadose Zone Journal* 20, no 6 (2021): e20163. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20163>.
- Houngue, Rita. « CLIMATE CHANGE IMPACTS ON HYDRODYNAMIC FUNCTIONING OF OUEME DELTA (BENIN) ». Ph.D Thesis, Univ. Abomey-Calavi, 2020.
- Hounsinou, Miriam, Ossénatou Mamadou, Maxime Wudba, Basile Kounouhewa, et Jean-Martial Cohard. « Integral turbulence characteristics over a clear woodland forest in northern Benin (West Africa) ». *Atmospheric Research* 268 (15 avril 2022): 105985. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105985>.
- Hounsinou, Miriam, Ossénatou Mamadou, et Basile Kounouhewa. « Turbulence Characteristics in the Atmospheric Surface Layer Over a Heterogeneous Cultivated Surface in a Tropical Region ». *Boundary-Layer Meteorology*, 24 juin 2023. <https://doi.org/10.1007/s10546-023-00815-z>.
- Kotchoni, D. O. Valerie, Jean-Michel Vouillamoz, Fabrice M. A. Lawson, Philippe Adjomayi, Moussa Boukari, et Richard G. Taylor. « Relationships between rainfall and groundwater recharge in seasonally humid Benin: a comparative analysis of long-term hydrographs in sedimentary and crystalline aquifers ». *Hydrogeology Journal* 27, no 2 (1 mars 2019): 447-57. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1806-2>.
- Kougbéagbédè, H., B. E. Houngninou, et S. Moumouni. « Modeling rain rate distribution per diameter class from disdrometer data collected in northern Benin (AMMA Campaign): a new relationship between radar reflectivity and rainfall rate ». *Int. J. Res. Innov. Earth Sci* 4, n° 3 (2017): 2394-1375.
- Kuppel, S., Tetzlaff, D., Maneta, M. P., and Soulsby, C.: What can we learn from multi-data calibration of a process-based ecohydrological model?, *Environmental Modelling & Software*, 101, 301–316, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.01.001>, 2018.
- Kuppel, S., Y. Godderis, J. Riotte, L. Ruiz, I. Braud, and M. Sekhar (2021). Bridging ecohydrology and geochemistry with a process-based model-data approach: a link between flow paths, root uptake and weathering patterns. 1st OZCAR TERENO Conference, Oct 2021, Strasbourg, France.
- Mamadou, O., S. Galle, Jean-Martial Cohard, Christophe Peugeot, Basile Kounouhewa, Romain Biron, Basile Hector, et Arnaud Bruno Zannou. « Dynamics of water vapor and energy exchanges above two contrasting Sudanian climate ecosystems in Northern Benin (West Africa) ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121, n° 19 (2016): 11,269-11,286. <https://doi.org/10.1002/2016jd024749>.
- Maxwell, Reed M., et Norman L. Miller. « Development of a Coupled Land Surface and Groundwater Model ». *Journal of Hydrometeorology* 6, n° 3 (1 juin 2005): 233-47. <https://doi.org/10.1175/jhm422.1>.
- Maxwell, Reed M., Laura E. Condon, Mohammad Danesh-Yazdi, et Lindsay A. Bearup. « Exploring source water mixing and transient residence time distributions of outflow and evapotranspiration with an integrated hydrologic model and Lagrangian particle tracking approach ». *Ecohydrology* 12, no 1 (1 janvier 2019): e2042. <https://doi.org/10.1002/eco.2042>.
- Ministère d'Etat Chargé du Développement, 2018. Plan National de Développement 2018-2025. Cotonou, Bénin. 300 p. https://www.gouv.bj/download/2/mpd_plan-national-developpement_2018-2025_final_14_janv.pdf
- Montero-Martinez Guillermo and F. Garcia-Garcia « On the Behaviour of Raindrop Fall Speed due to Wind » *Q. J. R. Meteorol. Soc.* (2016) DOI:10.1002/qj.2794
- Moumouni Sounmaïla, Fulgence Payot Akponi, Eric-Pascal Zahiri, Agnidé Emmanuel Lawin and Marielle Gosset « Impact of integration time steps of rain drop size distribution on their double-moment normalization: a case study in northern

- Benin » Comptes Rendus Géoscience – Sciences de la Planète, Vol.355 (2023): 109-133, <https://doi.org/10.5802/crgeos.200>
- Moumouni Sounmaïla, Loïc Saturnin Adjikpé, Agnidé Emmanuel Lawin « Impact of integration time steps of rain drop size distribution on their structuring and their modelling: a case study in northern Benin » Comptes Rendus Géoscience – Sciences de la Planète, Vol.353 (2021): 135-153, <https://doi.org/10.5802/crgeos.55> Nazoumou Y. Impacts Des Barrages Sur La Recharge Des Nappes En Zone Aride. pp260, Edited by Univ Européenne (22 mai 2011). ISBN-13 : 978-6131576409, 2011
- Nkrumah, Francis, Théo Vischel, Jeremy Panthou, Nana Ama Browne Klutse, David C. Adukpo, et Arona Diedhiou. « Recent Trends in the Daily Rainfall Regime in Southern West Africa ». *Atmosphere* 10, n° 12 (2019): 741.
- OmiDelta-INE, 2019. Etude du Plan Delta. Etat des lieux du delta de l'Ouémé. Cotonou, Bénin. 147 p. <https://www.scribd.com/document/548747246/20190904-OmiDelta-V1-RS-Etat-des-lieux-8MB#>
- Panthou, G., T. Vischel, et T. Lebel. « Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel ». *International Journal of Climatology* 34, no 15 (2014): 3998-4006. <https://doi.org/10.1002/joc.3984>.
- Rahimi, J., E. E. Ago, A. Ayantunde, S. Berger, J. Bogaert, K. Butterbach-Bahl, B. Cappelaere, et al. « Modelling Gas Exchange and Biomass Production in West African Sahelian and Sudanian Ecological Zones ». *Geosci. Model Dev. Discuss.* 2021 (2021): 1-39. <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-417>.
- Reichstein, Markus, Eva Falge, Dennis Baldocchi, Dario Papale, Marc Aubinet, Paul Berbigier, Christian Bernhofer, et al. « On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm ». *Global Change Biology* 11, n° 9 (1 septembre 2005): 1424-39. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>.
- Russo, Simone, Andrea F Marchese, J Sillmann, et Giuseppina Immé. « When will unusual heat waves become normal in a warming Africa? » *Environmental Research Letters* 11, no 5 (12 mai 2016): 054016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054016>.
- Seraphin P, Vallet-Coulomb C, Gonçalves J (2016) Partitioning groundwater recharge between rainfall infiltration and irrigation return flow using stable isotopes: the Crau aquifer, France. *J Hydrol.* <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.005>
- Sossou L., Peugeot C., Lawin E.A., Johannet A., Dossou M., Hounnou G. (in prep). Flood risk forecasting for the Ouémé River (Benin) using neural network models
- Souberou, Kafilatou, Joseph Oloukoi, et E. Amoussou. « Cartographie du potentiel en bas fonds aménageables de la commune de Materi au Bénin ». *Revue de géographie de Ouagadougou*, 2016. https://revuegeographieouaga.com/wp-content/uploads/2020/09/RGO_2016_V2_SOUBEROU.pdf.
- Sultan, Benjamin, Dimitri Defrance, et Toshichika Iizumi. « Evidence of crop production losses in West Africa due to historical global warming in two crop models ». *Scientific Reports* 9, n° 1 (6 septembre 2019): 12834.
- Tappan, G. G., W.M. Cushing, S.E. Cotillon, M.L. Mathis, J.A. Hutchinson, S.M. Herrmann, et K.J. Dalsted. « West Africa Land Use Land Cover Time Series: U.S. Geological Survey data releaseID - 1419 ». Édité par U.S. Geological Survey, 2016. <https://doi.org/10.5066/F73N21JF>.
- Taylor, Christopher M., Cornelia Klein, Douglas J. Parker, France Gerard, Valiyaveetil Shamsudheen Semeena, Emma J. Barton, et Bethan L. Harris. « “Late-stage” deforestation enhances storm trends in coastal West Africa ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, no 2 (2022): e2109285119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2109285119>.
- Taylor, Richard G., Martin C. Todd, Lister Kongola, Louise Maurice, Emmanuel Nahozya, Hosea Sanga, et Alan M. MacDonald. « Evidence of the dependence of groundwater resources on extreme rainfall in East Africa ». *Nature Clim. Change* 3, no 4 (2013): 374-78. <https://doi.org/10.1038/nclimate1731>.
- Testik Firat y. and Bin Pei « Wind Effects on the Shape of Raindrop Size Distribution » *Journal of hydrometeorology* Vol 18 (2017): 1285-1303 DOI: 10.1175/JHM-D-16-0211.1
- Yarou, Halissou, Alamou, Eric, Obada, Ezechiél & Biao, Ibukun Eliezer. Extreme Temperature Trends in the Beninese Niger River Basin (Benin). *American Journal of Climate Change*, 10 (04) (2021), 371—385.
- Vouillamoz, J.M., Tossa, A.Y.A., Chatenoux, B., Kpegli, K.A.R., 2015a. Propriétés des aquifères de socle du Bénin: analyse multivariées et multi-échelles des paramètres de contrôle. Presented at the « Aquifères de socle: le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-s/Yon juin 2015, La Roche sur Yon, p. 65.
- Vouillamoz, J. M., F. M. A. Lawson, N. Yalo, et M. Descloitres. « Groundwater in hard rocks of Benin: Regional storage and buffer capacity in the face of change ». *Journal of Hydrology* 520 (2015b): 379-86. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.024>.

- Wendling, V., Peugeot, C., Mayor, A.G., Hiernaux, P., Mougin, E., Grippa, M., Kergoat, L., Walcker, R., Galle, S., et Lebel, T., 2019. Drought-induced regime shift and resilience of a Sahelian ecohydrosystem. *Environmental Research Letters*, 14 (10), 105005.
- Wilcox, Catherine, Théo Vischel, Gérémy Panthou, Ansoumana Bodian, Juliette Blanchet, Luc Descroix, Guillaume Quantin, Claire Cassé, Bachir Tanimoun, et Soungalo Kone. « Trends in hydrological extremes in the Senegal and Niger Rivers ». *Journal of Hydrology* 566 (1 novembre 2018): 531-45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.063>.
- Zannou, Arnaud Bruno, Michel Yabi, Gafari Diallo, Modeste Spéro Tokpon, Vivien Agbakou, Sylvestre Adimi, Stanislas Yamontche, Dieu-donné Kaka, Jacques Kouazoude, Aristide Medenon, Alban Gildas Koutchade, Rachid Mama-sika, Alfred Yergo, Médar Togbenou, Raoufou Moutaïrou Badarou, Edouard Dahome, Paul Mouzoun, Raymonde Agbegninou, and Monique Fico. 2017. *Projet d'Aménagement Des Grands Barrages Hydroélectriques Multifonctions Sur Le Fleuve Ouémé Au Bénin: Etude Stratégique et Technico-Économique*. Cotonou.