

LMI REZOC - année 2021

Rapport annuel d'activité et d'exécution financière

Objectif du LMI REZOC

L'objectif du Laboratoire Mixte International "Centre d'étude des Ressources en Eau et de la Zone Critique" (LMI REZOC) est de mieux comprendre les interactions entre modifications du cycle de l'eau et changements environnementaux sur une planète en transition rapide. Ses recherches ambitionnent de contribuer à une gestion soutenable de l'eau au Bénin et plus largement en Afrique de l'Ouest. Il s'appuie sur les données de l'observatoire AMMA-CATCH pour mener ses recherches.

Membres du LMI REZOC

Le LMI REZOC est co-porté par l'Institut National de l'Eau du Bénin (INE) et l'Institut des Géosciences de l'Environnement de Grenoble (IGE). Dans une première phase de construction, il concentre ses activités sur le Bénin et associe 4 partenaires : l'INE, l'IGE ainsi que la Direction Générale de l'Eau du Bénin (DG-Eau) et l'UMR Hydrosiences Montpellier. Dans la deuxième phase il élargira ses analyses pour leur donner une extension régionale et associera d'autres partenaires.

Les co-directeurs du LMI REZOC sont Emmanuel A. Lawin (INE) et Sylvie Galle (IGE).

En 2021 le LMI REZOC comprend 44 membres¹ (dont 8 doctorants) et 34 associés qui représentent 30 ETP.

Animation du LMI REZOC et impact du Covid

Impact du coronavirus

En 2021, la crise sanitaire mondiale a moins affecté l'animation du LMI qu'en 2020. Les mobilités Sud ont été faites et une seule MLD a dû être annulée. Les principaux colloques internationaux auxquels les membres du LMI ont contribué ont tous pu se tenir, en présentiel ou en mode hybride (Colloque international AISH, Cotonou, Colloque international OZCAR/TERENO, Strasbourg). Par contre, la réunion avec les acteurs dans le domaine de l'eau, initialement prévue en 2021, a dû être repoussée en 2022.

¹ Membres du LMI : personnels justifiant d'au moins 25 % d'ETP dans le projet

Animation

En 2021 le Comité de Direction (CoDir) du LMI REZOC s'est réuni 11 fois par visio-conférence zoom pour coordonner les activités du LMI, organiser son animation scientifique et son appel d'offre annuel, ainsi que pour proposer des solutions pour s'adapter aux conséquences de la crise sanitaire du Covid-19.

Les échanges (encadrement de thèses, animations scientifiques) ont continué à se faire par visio-conférence, car nous avons trouvé que ce mode de communication permet un suivi plus fréquent.



Une nouvelle salle de visio conférence

La nouvelle salle de visioconférence à l'INE, cofinancée par le LMI REZOC, utilise un routeur, car la fibre n'est pas encore opérationnelle sur le Domaine Universitaire d'Abomey-Calavi. Par contre, la fibre est installée à la DG-Eau, ce qui permet un bon débit.



Salle de visioconférence de l'INE, cofinancée par le LMI REZOC

Webinaires du LMI

Les animations du LMI sont recensées sur [une page web](http://www.amma-catch.org/spip.php?article317)² hébergée par l'observatoire AMMA-CATCH. Le LMI compte se doter de son propre site web en 2022.

En 2021 le LMI REZOC a organisé plusieurs webinaires sur les résultats de ses recherches ou sur les méthodes pédagogiques (tableau 1). La forme est variable suivant les besoins. Ces webinaires sont ouverts à tous les membres du LMI. Les responsables des axes de recherche peuvent proposer des interventions.

² <http://www.amma-catch.org/spip.php?article317>

Tableau 1 : liste des webinaires 2021 du LMI et lien sur les documents produits

Date	Webinaire du LMI REZOC	Intervenant(s)
16/12/2020	Evolution de la climatologie des pluies et des températures au Bénin : que sait-on aujourd'hui ?	R. Kiki (Master 2)
13/01/2021	Enregistrer son cours et le déposer sur une plateforme Moodle. Intérêt de cet outil pour la pédagogie en classe inversée	J-P. Vandervaere
19/05/2021	Modélisation régionale de la Zone Critique	J-M Cohard, A. Depeyre, T. Pellarin, B. Hector
02/06/2021 10h-12h	<p>Stratégie de mesure du LMI au Sud du Bénin (4 exposés)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- "Sites d'observation d'eau souterraine au Bénin : où et pourquoi ?" 2- "Aperçu des premières mesures du Disdromètre optique et du Pluviomètre installés par le LMI-REZO à l'UAC en novembre 2020" 3- "Cause des pertes de débits sur l'Ouémé et le Zou : quelques hypothèses" 4- "Flux turbulents de l'atmosphère : utilité des mesures et sites/écosystèmes potentiels" 	<p>D.O.V. Kotchoni et col.</p> <p>S. Moumouni et col.</p> <p>R. Kpegli et col.</p> <p>O. Mamadou et col.</p>
09/06/2021 10h-12h	<p>Suivi géochimique des eaux de surface et souterraine dans le LMI REZOC (4 exposés)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- "<i>organigramme synthétique des activités liées à la qualité de l'eau de l'axe 2 du LMI REZOC</i> " => <i>annulé</i> 2- "Suivi hydrogéochimique des eaux souterraines et de surface sur le plateau d'Allada au Bénin" 3- "Suivis de l'oxygène 17 dans l'eau du sol, des feuilles, et du bois" 4- "Cartographie de la dynamique de l'occupation des terres de la zone critique sud du Bénin à partir de l'imagerie satellitaire SPOT" 	<p>F. Adandedji, D. Mama et col. (<i>annulé</i>)</p> <p>D.O.V. Kotchoni et col.</p> <p>C. Peugeot, A. Alexandre et col.</p> <p>M. Djaouga, O. Mamadou et D. Mama</p>
16/06/2021 10h-11h	Compte rendu de la visite des sites potentiels pour l'école de terrain en 2021	N. Yalo et col.
08/09/2021	Evolution de l'observatoire AMMA-CATCH (2022-2026) : ce qui va changer et implications pour le LMI	J-M Cohard
12/01/2021 10h-12h	<ul style="list-style-type: none"> • Estimation quantitative de la pluie, à partir des variables simulées des radars météorologiques, par la méthode de réseau de neurones artificiels • Tendances des indices des extrêmes pluviométriques AU BENIN, DE 1955 à 2016 	<p>AKPONI Fulgence P.</p> <p>KIKI Roland</p>
Date à venir	Inventaire comparé d'approches pour la critique de données	PANTHOU Gérémy et al.

Appel d'offre

En plus des dépenses programmées pour les axes, l'appel d'offre annuel finance quatre types de demandes pour laisser de la place aux initiatives et soutenir les travaux des étudiants (1) la participation à un colloque international pour présenter une communication, (2) la gratification de stage de M2 (6 mois), (3) l'environnement d'étudiants en thèse ou en master (ordinateur, mission, petit matériel, analyses, etc...), (4) des demandes d'équipement (maximum 3000 €).

Les réponses sont arbitrées par le CoDir avec les critères suivants :

- Pertinence du sujet par rapport aux livrables du LMI
- Pertinence scientifique de la proposition, adéquation des moyens et faisabilité
- Redondance avec des actions déjà démarrées
- Colloque : adéquation du colloque pour valoriser les résultats présentés (visibilité)

En 2021 nous avons reçu 36 projets (73 600 €), 27 ont été retenus pour un total de 32 500 €.

Activité scientifique des axes

Les activités scientifiques des axes du LMI REZOC ont été développées dans le cadre de la feuille de route élaborée en octobre 2019 au cours de l'atelier de travail REZOC réalisé à Cotonou (cf. rapport d'activité 2019 du LMI) : à partir d'applications pour le développement proposées par l'ensemble des parties présentes, nous avons identifiés les domaines dans lesquels de nouvelles connaissances devaient être produites et élaboré un plan d'action décliné en livrables.

En 2021, les 4 axes thématiques et l'axe transversal « formation et valorisation » ont travaillé sur les actions suivantes :

Axe 1 : « Analyse de la variabilité des pluies et des variables climatiques depuis les années 1950 »

Animateurs : Sounmaila Moumouni (INE) Théo Vischel (IGE)

Dans l'axe 1 les recherches développées en 2021 ont contribué aux objectifs suivants :

Nom du livrable	Actions	Valorisation
A1L1 : Analyse des tendances des variables climatiques historiques	Thèse de Roland KIKI (démarrée en 2021), Encadrant : S. Moumouni	Article scientifique en projet
A1L2 : Modélisation des intensités de pluie événementielle et	MLD Hilaire Kougbéagbé (EC INE) accueilli 2 mois à l'IGE (2019). Report MLD en 2021	Formation au calcul des courbes IDF ; Projet d'article
	M2 Thomas D'Aquin ALLAGBE,	Mémoire de Master soutenu en Juillet 2021

spatialisation des variables climatiques	Encadrant : Hilaire K. & S. Moumouni	
	Thèse Guillaume Chagnaud Encadrant : G. Panthou, T. Vischel	Article (Chagnaud et al.)
A1L3 : Analyse de la distribution granulométrique des pluies et estimation quantitative des pluies à partir des données des liens de télécommunication	Thèse de Loïc S. ADJIKPE (démarrée en 2016 et finalisée en 2021), Encadrant : S. Moumouni	Article scientifique publié (Moumouni et al.) Thèse de doctorat (soutenance prévue en Février 2022)
	Thèse de Fulgence P. AKPONI (démarrée en Novembre 2020), Encadrant : S. Moumouni	Article scientifique en projet

▪ Actualisation de la base de données climatologiques :

Les données disponibles sur le Bénin pour réaliser les recherches de l'axe 1 proviennent de deux sources :

- Le SNO AMMA-CATCH : période [1999-présent]
- Les données du réseau national de Météo Bénin disponibles sur la période [1950-2020]

Une demande d'actualisation des données pour les années les plus récentes a été initiée par le LMI auprès de Météo Bénin pour (i) actualiser les données de pluie sur 6 stations synoptiques du pays sur la période 1970-2020 et (ii) acquérir les autres données météorologiques [1955-2016].

Un accord avec Météo Bénin devrait permettre au LMI REZOC de bénéficier des données de Météo Bénin à un tarif recherche. Les données acquises par le LMI sont disponibles pour l'ensemble de ses membres qui en acceptent les conditions d'utilisation (voir formulaire en annexe 1).

▪ Première année de Thèse de Roland KIKI

Thème : « Analyse statistique des paramètres climatiques au Bénin, de 1955 à 2016 : caractéristiques globales et changements spatio-temporel »

Résultats : La première année de thèse est dans la continuité de son Master. Ainsi :

- Le Bénin a été divisé en cinq (05) zones climatiques : zone 1 (climat subéquatorial), zone 2 (climat guinéen), zone 3 (climat soudano-guinéen), zone 4 (climat soudanien) et zone 5 (climat subsahélien).
- Données : les pluies moyennes journalières sont calculées en prenant en compte uniquement les mesures des stations fonctionnelles de chaque jour. Les données ainsi obtenues sont sans lacunes.
- Dix-huit (18) indices d'extrêmes de pluviométrie sont analysés sur la période. Il s'agit : du cumul annuel de précipitation, de trois (03) indices de maxima de précipitation, de cinq (05) indices de nombre de jours pluvieux, de cinq (05) indices d'intensité moyenne de jours pluvieux, de deux (02) indices du nombre maximum de jours pluvieux consécutifs, et de deux (02) indices du nombre maximum de jours secs consécutifs.
- L'analyse de ces indices met en évidence deux phases de tendances sur chaque zone :

- **1955 à 1985** : une diminution significative de la pluviométrie dans toutes les zones, marquée par la diminution du cumul annuel, des nombres de jours pluvieux, des intensités moyennes des jours pluvieux et des nombres maximums de jours pluvieux consécutifs ; et une augmentation des nombres maximums de jours secs consécutifs.
- **1986 à 2016** : une augmentation de la pluviométrie dans quatre (04) zones sur cinq (05), mais moins significative que dans la première période. Cette augmentation est plus significative dans la zone subsahélienne que dans les trois autres. On note une anomalie dans la zone soudano-guinéenne (zone 3) marquée par une quasi stabilité ou une diminution des indices en faveur la pluviométrie (Figure 1).

Suite de cette thèse : L'étudiant analysera, dans la suite, la variabilité des autres paramètres climatiques et les liens entre leur variabilité et la pluie.

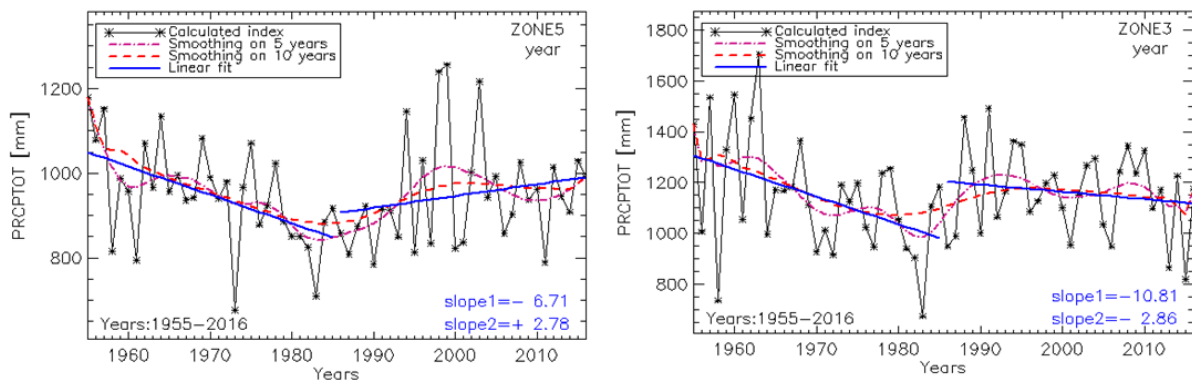


Figure 1 : tendance du cumul de pluie annuelle dans les zones 5 (subsahélienne) et 3 (soudano-guinéenne)

■ Mémoire de master de Thomas D'Aquin ALLAGBE

Thème : « Estimation des pluies maximales probables au Bénin »

Résultats : Le travail vise à mettre à la disposition des ingénieurs la cartographie des pluies maximales probables (PMP) au Bénin pour le dimensionnement des ouvrages, en s'appuyant sur la méthode de Hershfield (1961). Les PMP ont été calculées à partir des pluies journalières, de 1955 à 2016, de 42 stations pluviométriques réparties sur tout le Bénin.

■ Thèse de Loïc S. ADJIKPE

Thème : « Modélisation des distributions granulométriques des gouttes de pluies observées au Nord-Ouest du Bénin : analyse de l'impact de leur pas de temps d'intégration sur leur structuration et leur paramétrisation par le taux de pluie »

Résultats : Globalement, cette thèse a permis de mettre en évidence :

- l'impact du pas de temps d'intégration choisi, sur la structuration de la distribution de la taille des gouttes de pluie (DSD³);
- la dépendance des paramètres des fonctions de forme des modèles de DSD (gamma et lognormal) vis-à-vis du pas de temps d'intégration des DSD ;

³ DSD : Drop Size Distribution

- la dépendance des relations qui lient le taux de pluie aux variables météorologiques déduites de la DSD vis-à-vis du pas de temps d'intégration des DSD.

Perspectives : Cette thèse soulève une question importante : quelle est la cause des spectres de DSD multimodaux ? Ces spectres sont encore mal ajustés par les modèles de DSD unimodaux généralement employés. Cette compréhension pourrait être abordée si l'on parvenait à combiner la mesure des DSD avec celle des composantes du vent à haute fréquence.

En 2022, le LMI va installer un anémomètre sonique 3D haute fréquence à côté du disdromètre du LMI REZOC acheté en 2020 et installé à Abomey Calavi (Figure 2).

▪ Première année de Thèse de Fulgence AKPONI

Thème : « Estimation quantitative de la pluie, à partir des données simulées des radars météorologiques, par les méthodes d'optimisation des heuristiques »

Résultats : Les données utilisées sont des variables polarimétriques en bandes X simulées avec la méthode de la T-matrice à partir des DSD de pluie observées au nord-ouest du Bénin (Zahiri, 2007, Gosset et al., 2010). En utilisant la méthode des réseaux de neurones, il a évalué l'efficacité plusieurs algorithmes bi-variables et tri-variables d'estimation quantitative du taux de pluie. Il a aussi testé la sensibilité des algorithmes au nombre de couches cachées du réseau.

Suite de cette thèse : L'étudiant poursuivra l'évaluation des algorithmes en utilisant d'autres méthodes d'estimation des heuristiques tels que : la logique floue, les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaim de particules.

▪ Autres points notables : les premières données disdrométriques

Les premières données disdrométriques sont disponibles et les premières analyses (Figure 2) prouvent leur bonne qualité.

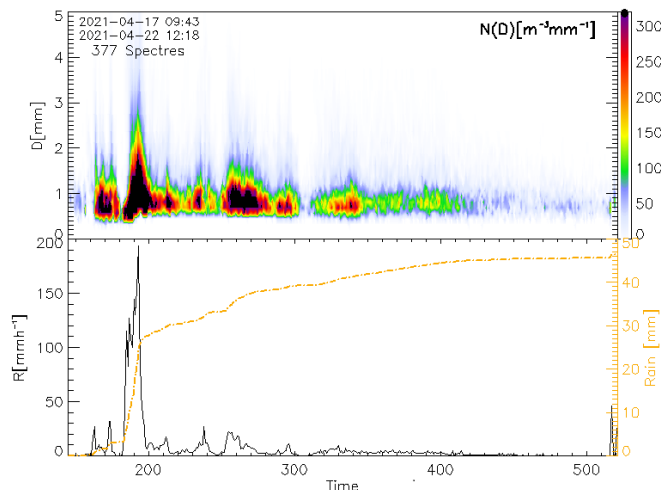


Figure 2 : Données du disdromètre installé sur le campus d'Abomey-Calavi. Distribution de la taille des gouttes de pluie (DSD) et taux de pluies mesurée

Remarques sur le fonctionnement de l'axe 1

Difficultés de mobilisation des acteurs autour de l'axe 1, trop de travaux sont encore faits de manière indépendante. Pas assez de co-encadrements Nord/Sud.

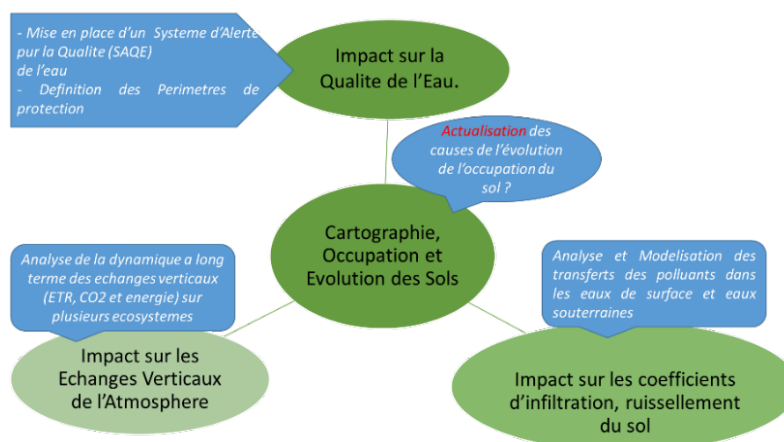
Axe 2 : « Impact du changement anthropique sur les processus de transferts et la qualité de l'eau »

Animateurs : Professeur Daouda Mama (INE) et Dr Ossénatou Mamadou (INE/IMSP⁴)

Dans l'axe 2 les recherches développées en 2021 ont contribué aux objectifs suivants :

Nom du livrable	Actions	Valorisation
A2L1 : Cartographie de l'évolution des grandes tendances d'occupation des sols par télédétection	Acquisition d'observations de terrain	Présentation d'un webinaire au LMI
A2L2 : Caractérisation de la variabilité de l'évapotranspiration sur forêt et sur culture	Qualification des séries de données de flux de AMMA-CATCH Bénin (10 ans)	2 publications (Davies et al., soumis, Hounsinou et al., soumis)
	Déploiement de 2 stations de flux au Sud du Bénin	
A2L3 : Mise en place d'un réseau de suivi de la qualité de l'eau de surface et souterraine sur plusieurs points au Bénin	Acquisition d'une sonde multi-paramètres pour le suivi de la qualité de l'eau	Mesures pas démarrées

Rappel de la feuille de route de l'axe 2



Les actions menées dans l'axe 2 au cours de l'année 2021 peuvent être regroupées en deux catégories :
i) activités scientifiques et ii) animation scientifique, valorisation et vulgarisation.

■ Activités scientifiques

Les différentes activités scientifiques en relation avec les livrables suscités sont :

- **A2L1** : L'utilisation des équipements acquis en 2020 (une tablette, deux GPS et un ordinateur portable pour la cartographie et la modélisation prédictive de l'occupation des sols) pour acquérir des observations de terrain. Un webinaire au LMI (voir tableau 1) portant sur les premiers résultats

⁴ IMSP : Institut de Mathématiques et de Sciences Physiques (Bénin), <http://www.imsp-benin.com>

obtenus a été effectué par Dr Djaouga Mama en juin 2021. Un article scientifique est actuellement en cours de finalisation par ce dernier.

- **A2L2** : Le traitement et la qualification des longues séries de données de flux de AMMA-CATCH Bénin (2007-2018) ont été achevés vers juillet 2021. Par ailleurs, le déploiement des stations de flux au Sud du Bénin a été effectif et une inter-comparaison des flux turbulents et du bilan radiatif suivant le gradient Sud/Nord pourra être effectué à court terme. Un travail d'inter-comparaison et de caractérisation en collaboration avec le KNUST⁵ (Ghana) a été déjà effectué mais en utilisant les composantes du bilan radiatif (Davies et al., soumis). Rappelons qu'un CDD de 3 mois avait été obtenu (A. Dembélé) en octobre 2020 pour tester des modèles de machine learning avec les données disponibles. Ce travail est toujours en cours (mais à temps partiel) et un rapport sera déposé à court terme.
- **A2L3** : Le Bénin est l'objet de grands changements dans les pratiques agricoles (déforestation, intensification, irrigation) mais ne dispose pas de série de données de la qualité des eaux sur le long terme (>10 ans). L'objectif de ce livrable est d'identifier les sites, de définir un protocole et de mettre en place un réseau sur les zones d'intérêt du LMI, pour quantifier l'impact de l'occupation des sols sur la qualité des eaux de surface et souterraines (pH, conductivité, MES, nutriments azotés et phosphorés, herbicides et fongicides). Pour ce qui concerne ce livrable, aucune activité spécifique n'a été effectuée.

▪ Animation scientifique et valorisation

- AGU 2021 Fall Meeting 2021, 13-17 Décembre 2021 (Mamadou et al., 2021)
- World Forum for Women in Science – Kenya, The 6th International Conference for Women in Science without Borders (WISWB), 3-5 November 2021 (Hounsinou et al., 2021)
- Conférence internationale sur les Dérivées Fractionnaires et Applications, IMSP Dangbo du 17 au 22 Mai 2021 (Mamadou, 2021)
- Webinaires du LMI REZOC, 2 et 9 Juin 2021 (2 présentations, voir tableau 1)
- Présentation scientifique des travaux en cours sur les flux de surface, aux journées scientifiques de l'observatoire AMMA-CATCH, 3-4 mars 2021

Remarque sur les activités de l'axe 2

L'axe 2 a une bonne dynamique mais n'a pas avancé sur le livrable A2L3, identifié dans sa feuille de route. Il est important de comprendre si les raisons en sont un mauvais positionnement scientifique, l'absence de personnes disponibles, ou une impossibilité matérielle.

Des réunions ont commencé pour préciser les objectifs, les verrous scientifiques et les zones d'intérêt pouvant permettre de faire avancer ce livrable. Les personnes ressource dans le LMI sont les suivantes : Daouda Mama Firmin Adandédji, Jean-Michel Vouillamoz, Valérie Kotchoni, Christophe Peugeot, ainsi que et Martial Dossou, directeur du service en charge du suivi de la qualité de l'eau en milieu naturel pour la DG-Eau.

⁵ KNUST : Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi, Ghana

Axe 3 : « Quantification des ressources en eau souterraine : stocks, renouvellement, évolution temporelle et exploitation durable »

Animateurs : Professeur Nicaise Yalo (INE) et Dr Jean-Michel Vouillamoz (IGE)

En 2021, les activités de l'axe 3 se sont concentrées sur les livrables A3L1 et A3L4. Pour ce faire, nous avons travaillé dans la zone de roche de socle qui couvre environ 70% de la superficie du pays, et dans le bassin sédimentaire côtier où sont situées les 3 plus grosses villes du Bénin.

Nom du livrable	Actions	Valorisation
A3L1 : Proposer une nouvelle méthode d'implantation des forages dans les zones de socle	Validation de la procédure d'implantation de forage que nous avons élaborée	
A3L4 : Définir des modalités d'exploitation durable de l'eau souterraine	Nous avons développé une nouvelle approche pour modéliser la durabilité d'un pompage à partir d'une simple mesure géophysique RMP réalisée à la surface du sol, avant même la construction du forage	

▪ Zone de roche de socle

Pour atteindre la couverture universelle en eau potable dès 2023, la stratégie nationale du Bénin n'est plus de construire des forages équipés de pompe à motricité humaine, mais de construire des réseaux de distribution d'eau qui desservent plusieurs villages à partir d'un seul forage. Or, les forages susceptibles de produire assez d'eau pour alimenter de tels réseaux sont rares (seul 17% des forages dans le socle du Bénin produisent plus de 5m³/h), mais surtout le débit de ces forages n'est souvent pas durable : la question adressée aux scientifiques par les opérateurs de terrain est donc de savoir comment estimer la durabilité d'un pompage lors de la phase de prospection de l'eau souterraine, c'est à dire avant même la réalisation du forage.

La durabilité d'un pompage est contrôlée au premier ordre par les réserves en eau souterraine qui vont alimenter le pompage entre deux épisodes de renouvellement (la recharge des réserves), et par la recharge des réserves qui va autoriser la durabilité interannuelle.

Or, nos travaux antérieurs avaient montrés que les propriétés hydrogéologiques, les réserves en eau souterraine et la recharge des aquifères de socle peuvent être quantifiées par l'analyse de mesures géophysiques RMP (Photo 1; Vouillamoz et al., 2014; 2015, Kotchoni, 2019).

Nous avons alors développé une nouvelle approche pour modéliser la durabilité d'un pompage à partir d'une simple mesure géophysique RMP réalisée à la surface du sol, avant même la construction du forage (livrable A3L4). Deux grandeurs sont utilisées pour estimer la durabilité du pompage projeté : l'une qui compare les volumes pompés à la réserve, et l'autre qui compare ces mêmes volumes à la recharge. Nous avons appliqué cette approche dans le cadre d'un travail conduit par un bureau d'étude en charge d'implanter 20 forages à gros débit au Bénin, et les résultats sont très encourageants.



Photo 1 : Réalisation d'un sondage géophysique RMP, photo F. Lawson

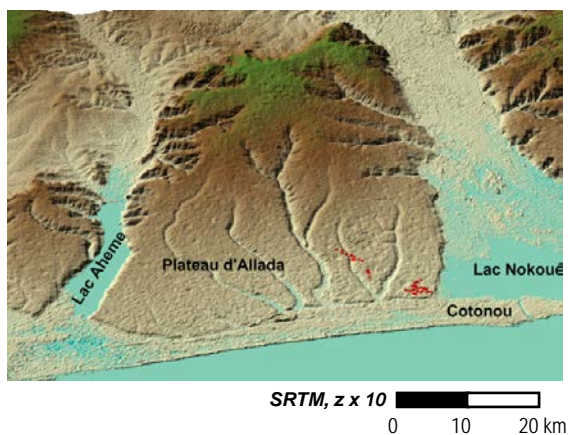
Avant de diffuser notre nouvelle approche au monde professionnel, nous devons encore la consolider avec un nombre d'expérimentations plus important que celui sur lequel la méthode a été élaborée. Pour ce faire, nous préparons une extension de nos activités dans une zone de socle sous conditions climatiques différentes de celles du Bénin : le Burkina Faso.

▪ Bassin sédimentaire côtier

L'aquifère du Mio-Pliocene du bassin côtier est largement utilisée par la société nationale du Bénin en charge de l'alimentation en eau en milieu urbain. Pour atteindre l'accès universel à l'eau potable de la capitale économique du pays (le Grand-Cotonou, environ 15% de la population du Bénin), la société nationale a planifié la réalisation d'un nouveau champ captant (un ensemble de forages) en compléments des 3 actuellement en exploitation (Figure 3A), pour augmenter la production d'eau de 20 000m³/j. Le choix du site de ce nouveau champ captant a été fait sur la base de cartes que nous avons préparées à cette fin au cours de la période précédente, à partir d'une approche novatrice (Figure 3B).

Les 8 forages ainsi réalisés produisent chacun de 50 à 170 m³/h, soit un débit moyen tout à fait cohérent avec nos estimations. **La procédure d'implantation de forage que nous avons élaborée est ainsi validée (délivrable A3L1).**

A



B

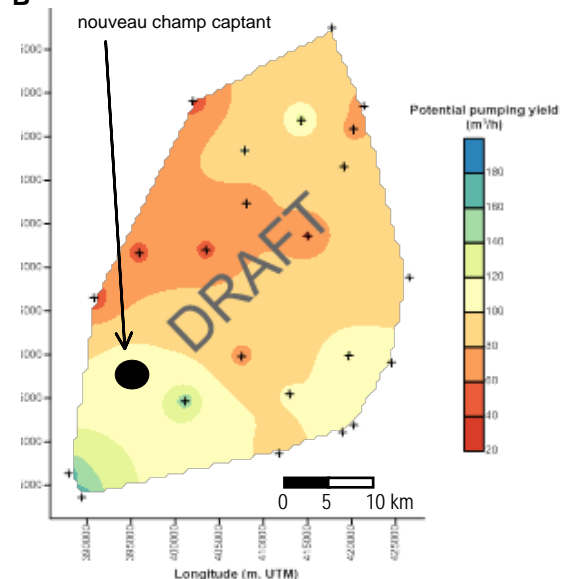


Figure 3 : Aquifère du Mio-Pliocene. 3A: Plateau d'Allada et champs captants existants (points rouge) qui alimentent le Grand-Cotonou. 3B : carte des débits potentiels et nouveau champ captant.

Afin de gérer durablement ces prélèvements de gros volumes d'eau pour alimenter le Grand-Cotonou, nous avons ensuite commencé à construire un modèle numérique de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada. La première étape a consisté à mieux comprendre le modèle conceptuel de cet aquifère. Pour ce faire, nous avons prélevé et analysé 172 échantillons d'eau de pluie, de surface et souterraine pour effectuer des analyses de ions majeurs, isotopes intrinsèques et traceurs CFCs, SF6 (Figure 4). Il s'agissait notamment de mieux comprendre les relations entre eau de surface et eau souterraine pour fixer les limites hydrodynamiques du modèle numérique.



Figure 4 : Prélèvements d'eau pour analyses hydro-chimiques. 4A: eau souterraine; 4B: lac Nokoué; 4C eau de pluie; 4D eau de source

Un premier modèle numérique de l'aquifère (70 km * 40 km, 1 million de nœuds) a alors pu être construit. Il est aujourd'hui en phase de validation avant de pouvoir être utilisé pour des simulations de la gestion de la ressource en eau souterraine (délivrable A3L4).

Dépôt de projets de recherche par l'axe 3

Les membres de l'axe 3 ont déposé plusieurs projets :

- Un projet « Ressources en eau dans le socle du Burkina-Faso » (RESOB) pour étendre le travail engagé sur la zone de socle du Bénin au contexte climatique du Burkina (AquaForAll, 200 k€, 2021-2023).
- Un projet de post-doc pour mieux comprendre les relations entre climat et recharge des aquifères de socle au Bénin et au Burkina (AIMS, African Institute for Mathematical Sciences, 25k€).
- Un projet de financement de thèse pour revisiter le modèle conceptuel des aquifères de socle (DAAD, Service des échanges académiques allemand, 5k€).

Axe 4 : « Analyse et modélisation du cycle de l'eau dans la Zone Critique »

Animateurs : Professeur Luc Sintondji (INE) et Dr Basile Hector (IGE)

Dans l'axe 4 les recherches développées en 2021 ont contribué aux objectifs suivants :

Nom du livrable	Actions	Production/Valorisation
A4L1 : Mise en œuvre d'un modèle de zone critique couplé pour le bassin versant de l'Ouémé	2 Missions Sud : F. Badou (EC INE) Y. M'po N'tcha (CDD INE) MLDs reportées en 2021	Formation au modèle intégré ParFlow-CLM
	Séjour René Bodjrenou (doctorant INE) accueilli 4 mois à l'IGE Grenoble (2021-2022), bourse SCAC	Présentation à la conférence OZCAR-TERENO (Bodjrenou et al.)
		Soumission d'un article (Bodjrenou et al.)
	Analyse de sensibilité du modèle à la paramétrisation de la subsurface en zone de socle	Publication d'un article dans Vadose Zone Journal (Herzog et al., 2021)
	MLD de Jean-Martial Cohard: implémentation de ParFlow-CLM sur le centre de calcul de l'IMSP (Bénin)	
A4L2 : Identifier le meilleur modèle pour l'alerte précoce aux inondations	Séjour Luc Sossou (doctorant INE/HSM) 6 mois à HSM, décalé en 2021	Communications en colloque (FRIEND-Cotonou)
A4L5: Mise en œuvre d'un modèle de zone critique couplé sur Afrique de l'Ouest	Première simulation régionale à très haute résolution sur l'Afrique de l'Ouest avec le modèle ParFlow-CLM.	Communications aux colloques: OZCAR-TERENO, AGU, FRIEND-Cotonou, et en interne au LMI.
	Animation d'un WP du projet IRD-AFD CECC (Cycle de l'Eau et Changement Climatique au Sahel)	Financement de 2 ans de post-doc sur la modélisation régionale
A4L6: Analyse prospective : changements de régime et points de bascule potentiels des hydro-systèmes en Afrique de l'Ouest.	Lancement du projet ANR TYPHIC sur les points de bascule en hydrologie.	Présentations au colloque OZCAR-TERENO (Peugeot et al., Wendling et al.)

- **Modélisation intégrée**

de l'Ouémé...

- **Simulation à petite échelle** (bassin versant de l'Ara, 12 km²). Les docteurs Félicien Badou et Yekambessoun M'po N'tcha ont pris en main le modèle ParFlow-CLM, ainsi que le travail à distance sur ordinateur, et ils ont assisté à l'école d'été sur la Zone Critique organisée par l'IR OZCAR. De retour au Bénin, ils ont pu déployer le modèle sur le nouveau ordinateur de l'IMSP (ASUKA) avec Jean-Martial Cohard, présent en MLD au Bénin. Des premières simulations à différentes résolutions de l'Ara, un sous-bassin de l'Ouémé, ont pu être réalisées et sont en cours d'exploitation.
- **Etude de sensibilité à méso-échelle** (bassin versant de l'Ouémé supérieur, 14 000 km²). En zone de socle soudanienne comme au Bénin, le modèle ParFlow-CLM est surtout sensible à la paramétrisation de la proche surface, et beaucoup moins aux distributions des propriétés d'aquifères, lorsqu'elles restent dans des gammes réalistes par rapport aux observations (Herzog et al., 2021). Cet article présente également la première simulation déployée sur l'Ouémé supérieur, avec un bon accord aux observations (débits, nappes, évapotranspiration).
- **Evaluation des forçages à grande échelle** (bassin versant de l'Ouémé 47 000 km²). René Bodjénou a présenté ses travaux sur l'évaluation de réanalyses climatiques sur le Bénin à la conférence internationale OZCAR-TERENO, et soumis le papier correspondant dans un journal international (Bodjrenou et al.). La prochaine étape sera l'étude de la réponse du bassin de l'Ouémé aux changements globaux, à l'aide du modèle ParFlow-CLM.

... à l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest

- **La première simulation régionale** à très haute résolution (1km², 30min) d'une année sur l'Afrique de l'Ouest a été réalisée avec succès grâce au modèle ParFlow-CLM déployé sur le TGCC (Très Grand Centre de Calcul) du CEA⁶ (France). Ces résultats, encore en cours d'exploitation, ont déjà été présentés en interne au LMI, ainsi qu'aux conférences OZCAR-TERENO, à la 4^{ème} conférence internationale sur les grands fleuves d'Afriques (FRIENDS) et à l'AGU (Depeyre et al., 2021, Cohard et al., 2021a, Cohard et al., 2021b) et seront soumis pour publication en 2022.
- La continuation de ces simulations est garantie grâce à deux ans de post-doc qui ont été obtenus dans le cadre du projet IRD-AFD CECC (Cycle de l'eau et Changements Climatiques au Sahel) qui débute fin 2021 et dont plusieurs membres du LMI sont co-porteurs du WP « modélisation hydro-climatique régionale ».

- **Alerte précoce des crues**

Luc Sossou a obtenu une bourse de thèse ARTS à compter du 1/4/2021 et a effectué un séjour à Montpellier entre avril et octobre 2021. Il a participé à l'encadrement d'un stage de 2 étudiantes de l'école des mines d'Alès sur la modélisation des débits par réseaux de neurones, et a participé à la

⁶ CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique

conférence FRIEND sur les grands fleuves à Cotonou (15-18 nov 2021). Son second comité de thèse s'est tenu en septembre.

- **Changements de régime et points de bascule potentiels des hydro-systèmes en Afrique de l'Ouest**

Le projet ANR TYPHIC (Exploration des points de bascule dans le cycle hydrologique ouest-africain), a démarré début 2021 avec de nombreuses réunions en distanciel, et le déploiement d'un travail collaboratif autour de l'identification des composantes cibles des systèmes dynamiques impliquant les hydrosystèmes en Afrique de l'Ouest, ainsi que leur modélisation. Il implique des chercheurs travaillant sous les climats soudanien (Bénin) et sahélien (Niger, Mali). Les premiers résultats ont pu être présentés à la conférence OZCAR TERENO (Wendling et al., 2021, Peugeot et al., 2021).

Démarrage de deux projets de recherche

L'année 2021 a vu démarrer 2 projets de recherche dont les membres du LMI sont porteurs

- ANR Tiphyc « Exploring tipping points in the West African hydrological cycle », porteur C. Peugeot (460 k€, 2021-2024)
- IRD-AFD CECC (Cycle de l'eau et Changements Climatiques au Sahel), J-M. Cohard co-porteur d'un WP (total projet 3 M€, dont 124 k€ pour la modélisation ; 2021-2024)

Axe transversal : « Formation et valorisation »

Animateurs : Professeur Eric Alamou (INE) et Dr Jean-Pierre Vandervaere (IGE)

L'axe formation et valorisation a eu deux activités principales en 2021 : l'organisation de la première école de terrain du LMI et la formation à la pédagogie inversée avec l'outil Moodle. Les membres du LMI ont également organisé 3 formations spécifiques, destinées aux hydrologues.

- **Première Ecole de terrain « Bilan hydrique de la zone critique »**

En 2021 a eu lieu la première édition de l'école de terrain « **Bilan hydrique de la zone critique en zone sédimentaire** », commune au LMI REZOC et au Centre d'Excellence C2EA⁷. Ce projet a été défini et conçu par une équipe coordonnée par N. Yalo (INE/UAC⁸) et J-P. Vandervaere (IGE/UGA⁹). Cette école intégratrice des savoirs vient renforcer les parcours pédagogiques des 3 masters du centre d'Excellence.

Objectifs pédagogiques

Les objectifs pédagogiques de cette école de terrain sont axés sur l'acquisition des compétences pratiques et techniques des apprenants. A la fin de l'école de terrain les apprenants sont autonomes

⁷ C2EA : Centre d'Excellence Africain pour l'Eau et l'Assainissement, porté par l'Institut National de l'Eau

⁸ UAC : Université d'Abomey-Calavi

⁹ UGA : Université Grenoble Alpes

dans la manipulation des équipements de mesure sur le terrain et ont développé la capacité de prise de décision quant au choix des méthodes pour l'atteinte des résultats qu'ils attendent.

Basé sur une pédagogie active, l'école de terrain se déroule en 4 phases.

- Phase I : les étudiants sont reçus une matinée par les intervenants et leurs collègues afin de leur exposer les objectifs de l'école de terrain et leur rappeler les éléments de théorie nécessaires à la bonne exécution des tâches.
- Phase II : le stage de terrain lui-même (voir détails ci-dessous).
- Phase III : appui aux analyses et aux calculs réalisés par les étudiants pour s'approprier pleinement leurs résultats. Elle a été réalisée avec le soutien des enseignants en présentiel le 20 septembre 2021.
- Phase IV : restitution finale devant un auditoire. Elle s'est faite sur un mode mixte présentiel /distanciel en présence des encadrants mais aussi d'enseignants de l'INE n'ayant pas participé à la phase de terrain.

Description de la phase de terrain

Du 16 au 18 septembre 2021, la phase de terrain s'est déroulée en présence de 20 étudiants de M2 issus de trois Masters de l'INE/UAC. Elle s'est tenue sur les terrains de la ferme école de SAIN, située à 45 km au Nord de Porto Novo. Pendant trois demi-journées d'activités, les étudiants se sont succédés pour suivre tour à tour les trois ateliers, chacun sur 1/2 journée: (1) hydrologie de surface et souterraine, (2) qualité des eaux et (3) infiltrométrie et tensiométrie.

Les effectifs des sous-groupes, étaient de 6 ou 7 étudiants. Lors de la constitution des sous-groupes, nous avons encouragé la mixité en termes à la fois de genre et de formation d'origine. Chaque formateur a défini les objectifs pédagogiques de son atelier.

Ateliers 2021 :

Atelier :	Hydrologie et Hydrogéologie	Qualité des eaux	Infiltrométrie et Tensiométrie
Formateur : Laboratoire/Université	Y. N'TCHA M'PO INE/UAC	Flavien DOVONOU INE/UAC	J-P VANDERVAERE IGE/UGA
Matériel utilisé:	Courantomètre (1) Sonde piézométrique (1)	Sonde Multiparamètre (1)	Infiltromètres (2) Tensiomètres (5) Capteur tensimètre (1)

Le Dr J-M Cohard de l'IGE, en mission au Bénin, est venu dès le 2ème jour pour observer le déroulement des ateliers et apporter son expertise sur la modélisation hydrologique.



Photos 2. Etudiants travaillant sur un atelier ; photo de groupe des participants

Pédagogie inversée

Le premier soir, à l'issue des deux premières rotations, des restitutions à chaud ont été faites par quelques étudiants volontaires. Cette démarche de pédagogie inversée permet de mettre l'étudiant en position d'expliquer publiquement les objectifs et les méthodes des ateliers. Cette position oblige l'étudiant à maîtriser les concepts et aide à la mémorisation du fait de sa posture active. Les étudiants qui écoutent sont particulièrement attentifs à la restitution de leurs collègues ayant vécu la même expérience lors de l'atelier. L'usage de formulations des étudiants pour les étudiants active la transmission par des canaux différents. Toutes les activités ont ainsi été restituées sous le regard de l'équipe enseignante qui n'intervient que si c'est nécessaire. Des commentaires bienveillants et constructifs ont été faits à l'issue de cette séance.

Un bilan positif

Les étudiants ont fait part de leur satisfaction, soulignant le fait que les postures actives sont un atout indéniable pour l'apprentissage.

Il faut noter que tous les étudiants sans exception ont été très actifs dans tous les ateliers, ce qui était l'objectif recherché. On a même remarqué qu'ils se sont spontanément réunis pour commencer à rédiger leur rapport écrit ce qui est un très bon signe de leur motivation. Enfin, le site de Sain est très bien adapté au format d'une Ecole de Terrain avec de grands espaces variés, un forage, des piézomètres, des champs cultivés, de la forêt, des mares, un cours d'eau proche et de bonnes capacités d'hébergement. Il serait souhaitable de maintenir les futures écoles de terrain sur ce site.

Evolutions prévues en 2022

La première école de terrain effectuée en 2021 a permis de tester la formule et de viser quelques améliorations pour les éditions suivantes de l'école de terrain intégratrice des savoirs « Bilan hydrique de la zone critique en milieu sédimentaire ».

Nous visons, pour 2022, une version enrichie pour faire travailler les étudiants sur 6 ateliers (3 en 2021) permettant une pratique hydrologique plus complète. La ferme école de SAIN est bien adaptée pour ce format.

L'édition 2022 pourrait ainsi accueillir, 30 étudiants (20 en 2021) dans des conditions pédagogiques optimales : 5 étudiants par sous-groupe, afin que chacun manipule réellement tous les instruments apportés. L'équipe de formateurs serait constituée de 4 enseignants béninois et de 2 français. Sa durée serait de 3 jours. Il est nécessaire de finaliser la programmation de l'école de terrain en janvier.

Deux demandes de soutien financier à ce projet co-porté ont été déposées : (i) un Projet structurant de formation (PSF) à l'IRD en septembre 2021 et (ii) au Comité National de Pilotage de C2EA en novembre 2021.

▪ Webinaire de formation à l'outil Moodle pour la classe inversée

Le 13 janvier 2021, une demi-journée de formation à distance en format webinaire a été réalisée à destination des enseignants permanents et non permanents du LMI, avec l'appui du Campus Numérique Francophone de l'UAC. L'objectif était de montrer le fonctionnement de la plateforme Moodle et son intérêt pour la mise en place d'une pédagogie inversée. Les principes de la classe inversée ont d'abord été exposés et discutés. Ensuite, les outils de diffusion de connaissances tels que MOOCs et SPOCs ont été évoqués pour leur intérêt en termes de pratiques pédagogiques efficaces : libérer des heures de cours magistral pour augmenter le travail en petits groupes avec des étudiants plus actifs. Enfin, la plateforme Moodle a été présentée et les aspects techniques (chaîne Youtube, Creative Commons, Zoom...) ont été abordés en faisant déposer une vidéo en ligne à tous les participants.

Le Webinaire, suivi par une trentaine de participants, a été enregistré et mis à disposition.

Pour les enseignants qui souhaitent passer à une phase réelle de mise en ligne de leurs cours, une deuxième session de formation en présentiel à Cotonou pourra être envisagée en 2022 afin d'aborder tous les aspects liés à la scénarisation pédagogique d'un cours avec exercices.

▪ **Formations spécifiques dispensées par les membres du LMI**

- « Calcul de la recharge des aquifères par la méthode de fluctuation du niveau des nappes ». 16 et 17 septembre 2021, IGE, 8 participants (dont 3 du Bénin, 2 du Niger, 1 de Cote d'Ivoire et 2 de France)
- « Modélisation numérique des aquifères ». du 18 au 25 octobre 2021, INE, 6 participants (5 étudiants de l'INE et 1 du Burkina)
- « Introduction à la programmation python avec exemple applicatif : traitement des bases de données de forage ». octobre 2021, IGE, 7 participants (4 béninois, 1 ivoirien, 1 nigérien, 1 français).

▪ **Formations suivies par les membres du LMI**

Zone critique

L'[école d'été sur la Zone Critique](#) organisée par l'Infrastructure de Recherche OZCAR fait intervenir des experts de chacune des disciplines qui composent la science de la Zone Critique, à l'occasion de cours sur les bases conceptuelles et pratiques (hydrologie, hydrogéologie, géophysique, géochimie, écologie microbienne, transport réactif, hydro-météorologie, géologie, science du sol, géomorphologie, télédétection...), proposant ainsi un panorama des connaissances et des outils essentiels propres à chaque champ disciplinaire utile à l'étude de la Zone Critique.

Quatre membres du LMI, soutenus par l'IRD, ont suivi la première édition (francophone) de cette école (11 au 16 juillet 2021, France): F. Badou, Y. M'po N'tcha, R. Bodjrenou, H. Alassane Hado. J-M. Cohard y était enseignant.

Télédétection

Le LMI a financé deux étudiants pour suivre la formation « Introduction à l'utilisation des données satellitaires pour l'hydrologie: Principes et exemples d'usage sur quelques Grands bassins africains » organisée par l'AISH (19-20 nov. 2021) à l'occasion de la [4ème Conférence internationale sur l'hydrologie des grands fleuves d'Afrique](#) qui a eu lieu au Bénin : Luc Sossou et Amédée Chabi.

▪ **Organisation de sessions spéciales lors de conférences internationales**

- **Galle, S.**, et H. Kunstmann. Co-convenors of the session. « Challenges in understanding Critical Zone (CZ) processes in Africa » ». In *Advancing Critical Zone science. First OZCAR TERENO Int. Conf.* Strasbourg, France, 2021. <https://ozcartereno2020.sciencesconf.org/resource/page/id/27>.
- **Cohard J-M., E.A. Lawin** et R. Taylor, Co-convenors of the session. « AGU: H036 - Changing water cycles in African drylands to global change ». In AGU Fall Meeting. New Orleans, 13-17 dec 2021.

Production Scientifique du LMI REZOC

Les noms des membres du LMI sont indiqués en *gras*.

Articles dans des revues internationales à comité de lecture

Soumis

- Bodjrénou, R., Cohard, J.-M., Hector, B., Lawin, E. A., Chagnaud, G., Danso, D. K., N'tcha M'po, Y., Badou, F., and Ahamide, B.** "Evaluation of ERA5 and MERRA2 climate trends and variability from 1980 to present for hydrological modelling in Benin (West Africa)". Soumis à *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
- Davies P., **O. Mamadou**, E. Quansah, J. N. A. Aryee, W.A. Atiah, L. K. Amekudzi, F. Sam, **S. Galle**, J. Demarty. "Variability in Surface Radiative Fluxes over West Africa using Wavelet and Principal Component Analyses", *submitted* to Journal of Applied Meteorology and Climatology (JAMC-D-21-0187), aout 2021.
- Hounsinou M., Mamadou O.,** Wudba M., Kounouhéwa B. and Cohard J.-M.: "Integral turbulence characteristics over a clear woodland forest in northern Benin (West Africa)", en révision dans Atmospheric Research

2021

- Anwar, S. A., **Mamadou, O.**, Diallo, I., and Sylla, M. B.: On the Influence of Vegetation Cover Changes and Vegetation-Runoff Systems on the Simulated Summer Potential Evapotranspiration of Tropical Africa Using RegCM4, *Earth Syst Environ*, 5, 883–897, <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00252-3>, 2021.
- Chagnaud, G., G. Panthou, T. Vischel,** J. Blanchet, et T. 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*, 2 juin 2021. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03650-9>.
- Colliander, A., Reichle et al. (47 co-authors, including **Pellarin, T.**): Validation of Soil Moisture Data Products from the NASA SMAP Mission, *subm. to IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTAR)*, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3124743>, 2021.
- Fovet, O., Belemtougri, A., Boithias, L., Braud, I., Charlier, J., Cottet, M., Daudin, K., Dramais, G., Ducharne, A., Folton, N., Grippa, **M., Hector, B.,** Kuppel, S., Le Coz, J., Legal, L., Martin, P., Moatar, F., Molénat, J., Probst, A., Riotte, J., Vidal, J., Vinatier, F., and Datry, T.: Intermittent rivers and ephemeral streams: Perspectives for critical zone science and research on socio-ecosystems, *WIREs Water*, 8, <https://doi.org/10.1002/wat2.1523>, 2021.
- Herzog, A., **B. Hector, J. M. Cohard, J. M. Vouillamoz, F. M. A. Lawson, C. Peugeot,** et I.E.M. De Graaf. « A Parametric Sensitivity Analysis For Prioritizing Regolith Knowledge Needs For Modeling Water Transfers In The West African Critical Zone ». *Vadose Zone Journal*, in press. <https://ozcartereno2020.sciencesconf.org/resource/page/id/27>.
- Hounkpè, J., Badou, D. F.,** Bossa, A. Y., Yira, Y., Adounkpè, J., **Alamou, E. A., Lawin, E. A., Sintondji, L. O. C., Afouda, A. A., and Amoussou, E.**: Assessment of flood discharge sensitivity to climate indexes in West Africa, *Proc. IAHS*, 384, 219–224, <https://doi.org/10.5194/piahs-384-219-2021>, 2021.
- Malam Abdou, M., **J.-P. Vandervaere,** L. Descroix, et I. Bouzou Moussa. « Comparative Hydrodynamic Study of Granitic and Sedimentary Catchments in Western Niger ». *Hydrological Sciences*

Journal 66, n° 10 (27 juillet 2021): 1541-51.

<https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1921181>.

Moumouni, S., L. S. Adjikpé, et Agnidé E.A. « Impact of Integration Time Steps of Rain Drop Size Distribution on Their Structuring and Their Modelling: A Case Study in Northern Benin ». *Comptes Rendus Geoscience* 353, n° 1 (27 mai 2021): 135-53.

<https://doi.org/10.5802/crgeos.55>.

Obada, E., Alamou, E. A., Biao, E. I., and Zandagba, E. B. J.: Interannual Variability and Trends of Extreme Rainfall Indices over Benin, *Climate*, 9, 160, <https://doi.org/10.3390/cli9110160>, 2021.

Outrequin, C., Alexandre, A., Vallet-Coulomb, C., Piel, C., Devidal, S., Landais, A., Couapel, M., Mazur, J.-C., **Peugeot, C.**, Pierre, M., Prié, F., Roy, J., Sonzogni, C., and Voigt, C.: The triple oxygen isotope composition of phytoliths, a new proxy of atmospheric relative humidity: controls of soil water isotope composition, temperature, CO₂ concentration and relative humidity, *Climate of the Past (Discussion)* <https://doi.org/10.5194/cp-2021-34>, 2021.

Rahimi, J., Ago, E. E., Ayantunde, A., Berger, S., Bogaert, J., Butterbach-Bahl, K., Cappelaere, B., **Cohard, J.-M.**, Demarty, J., Diouf, A. A., Falk, U., Haas, E., Hiernaux, P., Kraus, D., Roupsard, O., Scheer, C., Srivastava, A. K., Tagesson, T., and Grote, R.: Modeling gas exchange and biomass production in West African Sahelian and Sudanian ecological zones, *Geoscientific Model Dev.*, 14, 3789–3812, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3789-2021>, 2021.

Wilcox, C., C. Aly, **T. Vischel, G. Panthou, J. Blanchet, G. Quantin,** et T. Lebel. « Stochastorm: A Stochastic Rainfall Simulator for Convective Storms ». *Journal of Hydrometeorology* 22, n° 2 (février 2021): 387-404. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0017.1>.

2020

Attogouinon A., **A. E. Lawin,** & J-F Deliège. « Evaluation of General Circulation Models over the Upper Ouémé River Basin in the Republic of Benin ». *Hydrology* 7, n° 1 (14 février 2020): 11.

<https://doi.org/10.3390/hydrology7010011>.

Braud I., **V. Chaffard,** C. Coussot, **S. Galle,** P. Juen, et al. (2020) « Building the Information System of the French Critical Zone Observatories Network: Theia/OZCAR-IS ». *Hydrological Sciences Journal* Special Issue: Hydrological data: opportunities and barriers (4 mai 2020):

02626667.2020.1764568. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1764568>.

Chagnaud G., H. Gallée, T. Lebel, G. Panthou, et **T. Vischel.** « A Boundary Forcing Sensitivity Analysis of the West African Monsoon Simulated by the Modèle Atmosphérique Régional ». *Atmosphere* 11, n° 2 (11 février 2020): 191. <https://doi.org/10.3390/atmos11020191>.

Houéménou H., S. Tweed, G. Dobigny, **D. Mama, A. Alassane,** R. Silmer, M. Babic, S. Ruy, A. Chaigneau, P. Gauthier, **A. Socohou,** H-J. Dossou, S. Badou, M. Leblanc (2020). « Degradation of Groundwater Quality in Expanding Cities in West Africa. A Case Study of the Unregulated Shallow Aquifer in Cotonou ». *Journal of Hydrology* 582 : 124438.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124438>

Legchenko A., B. Texier, J-F. Girard, **J.-M. Vouillamoz, F.M.A. Lawson, I.C. Alle,** J.-M. Baltassat, G. Pierrat, et **M. Boucher.** « Feasibility Study of a Surface-Borehole NMR Method ». *Journal of Applied Geophysics* 177 (juin 2020): 104039. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104039>.

Yalo N, Akokponhoué BH, Akokponhoué NY, Marc YT, Alassane A, Hounton C and Suanon F (2020). Geophysical Geometry of Fracture Zones in the Basement Rocks of the Donga Department Northwest of Benin. *Journal of Geology & Geophysics*, Vol. 9 Iss. 1 No: 475, (2020), pp. 1-12. ISSN 2381-8719, <https://www.longdom.org/abstract/>

Yalo E.N., R. H. Chodaton, E. Kounika, **M. Boucher** et **C. Allé** (2020): Délimitation géophysique de l'interface eau douce - eau salée dans les sables bruns de la plaine côtière de la commune de Sèmè-kpodji. *Afrique SCIENCE* 12(6) 206 – 216. ISSN1813-548 X, <http://afriquescience.net/PDF/16/2/19.pdf>

Autres revues

- Mathy, Sandrine, OlivieMathy, S., Labussière, O., Lavorel, S., Lebel, T., Schmitt, B., and le collectif « Autour du 2 °C 2019 » (incluant **S. Galle et V. Wendling**) : Les enjeux de l'interdisciplinarité de la recherche et des parcours de formation sur le changement climatique : l'école d'été « Autour du 2 °C », Nat. Sci. Soc., <https://doi.org/10.1051/nss/2021017>, 2021.
- Yarou, H., Alamou, E., Obada, E., and Biao, I. E.: Extreme Temperature Trends in the Beninese Niger River Basin (Benin), American Journal of Climate Change, 10, 371–385, <https://doi.org/10.4236/ajcc.2021.104018>, 2021.

Communications dans des colloques et conférences internationales

On ne recense ici que les communications *financées par le LMI REZOC* (déplacement ou mission ou inscription).

2021

- Ahamide, B., D.F. Badou, R. Bodjréno, G. Chagnaud, J. M. Cohard, D. Danso, B. Hector, E.A. Lawin, et Y. N'tcha M'Po. « Climate Change from 1980 to present and performance of ERA5 and MERRA2 datasets for hydrological modelling purposes in Benin: lessons learnt ». In *Advancing Critical Zone science. First OZCAR TERENO International Conference*, 355-56. Strasbourg (France), 2021. <https://ozcartereno2020.sciencesconf.org/resource/page/id/27>.
- Biao, I.E. « Hydrological Modelling of the Mono River Basin at Athiéme ». In *4th Int. Conf. of the Great Rivers of Africa*. Cotonou, Bénin, 2021. <https://friendgrandsfleuvesafriquecotonou2020.org/friend/>.
- Braud, I, O. Ka, et al., including, B. Hector, S. Galle, C. Peugeot, et M. Wubda. « Use of hydrological signatures to characterize the hydrological functioning of catchments from the OZCAR French Critical Zone ». In *Advancing Critical Zone science. First OZCAR TERENO International Conference*, 22-23. Strasbourg (France), 2021. <https://ozcartereno2020.sciencesconf.org/resource/page/id/27>.
- Chabi, A. « Potential impact of climate change on water availability in the Ouémé catchment at the outlet of the Savè's bridge and on the Ilauko reservoir (Benin, West Africa). » In *4th Int. Conf. of the Great Rivers of Africa*. Cotonou, Bénin, 2021. <https://friendgrandsfleuvesafriquecotonou2020.org/friend/>.
- Cohard, J.-M., B. Hector, T. Pellarin, et A. Depeyre. « First results of a hyper-resolution continental west africa simulation with a critical zone model ». In *Advancing Critical Zone science. First OZCAR TERENO International Conference*, 359-60. Strasbourg (France), 2021. <https://ozcartereno2020.sciencesconf.org/resource/page/id/27>.
- Cohard, J.-M., Hector, B., Pellarin, T., Depeyre, Condon, L., A., Maxwell, A.: « hyper-resolution critical zone modeling for continental west Africa to simulate water budgets: first results ». AGU Fall Meeting. New Orleans, H55G-0820, 2021, oral. <https://agu.confex.com/agu/fm21/meetingapp.cgi/Paper/911925>
- Depeyre, A., Cohard, J.-M., Hector, B., Pellarin, T. & the LMI REZOC TEAM: First results from a physics based hyperresolved model at the scale of the West African Critical Zone. IASH 4th international conference on the hydrology of the Great Rivers of Africa, Cotonou, Benin, November 2021, Oral
- Gaillardet, J., I. Braud, B. Mercier, V. Entringer, et S. Galle. « The OZCAR Tree: a tool to visualize the scientific and institutional organization of the OZCAR French Critical Zone Observatories network ». In *Advancing Critical Zone science. First OZCAR TERENO International Conference*,

- 52-53. Strasbourg (France, 2021).
<https://ozcartereno2020.sciencesconf.org/resource/page/id/27>.
- Herzog, A., **B. Hector**, J. M. Cohard, J. M. Vouillamoz, F. M. A. Lawson, C. Peugeot, et I. De Graaf. « The Representation Of Regolith Hydraulic Conductivity For Modeling Water Transfers In The West African Critical Zone ». In *Advancing Critical Zone science. First OZCAR TERENO International Conference*, 363-64. Strasbourg (France), 2021.
<https://ozcartereno2020.sciencesconf.org/resource/page/id/27>.
- Hounsinou M.** : Modélisation des caractéristiques intégrales de turbulence en utilisant la théorie de similarité de Monin et Obukhov. Conf. Internat. sur les Dérivées Fractionnaires et Applications, IMSP Dangbo, Bénin, 17-22 Mai 2021.
- Hounsinou M., O. Mamadou & B. Kounouhéwa** : Comparison of three gap-filling approaches in the latent heat flux measurements. World Forum for Women in Science – Kenya, The 6th Internat. Conf. for Women in Science without Borders (WISWB), 3-5 November 2021.
- Koukpohounsi B., N. Yalo, J. M. Vouillamoz, F. M. A. Lawson, I.C. Alle, D.O.V. Kotchoni, B. Guidah Chabi**, et al. « Spatio-temporal and comparative analysis of the behavior of the mio-pliocene aquifer in relation to rainfall on the Allada and Sak et e highlands in southern Benin ». In *Advancing Critical Zone science. First OZCAR TERENO International Conference*, 52-53. Strasbourg (France), 2021. <https://ozcartereno2020.sciencesconf.org/resource/page/id/27>.
- Lawin, A. E.** « Présentation Réseau PHI UNESCO, Bénin ». In *4th Int. Conf. of the Great Rivers of Africa*. Cotonou, Bénin, 2021. <https://friendgrandsfleuvesafriquecotonou2020.org/friend/>.
- Mamadou O.** : Energy partitioning and its underlying processes inferred by Eddy Covariance in West Africa. Conf. Internat. sur les Dérivées Fractionnaires et Applications, IMSP Dangbo, Bénin, 17-22 Mai 2021.
- Mamadou, O., Hounsinou, M., Wubda, M., Kounouhewa, B., and Cohard, J.-M.**: Integral turbulence characteristics over a clear woodland forest in northern Benin (West Africa), in: AGU Fall Meeting, New Orleans (USA), B15H-1526, 2021. (poster)
<https://agu.confex.com/agu/fm21/meetingapp.cgi/Paper/927797>
- Moumouni, S., L.S. Adjikpé, F.P. Akponi, et H. kougbeagbede.** « Impact of integration time steps of rain drop size distribution on their structuring and their modelling: a case study in northern Benin ». In *Congrès de la SOAPHYS (Société Ouest Africaine de Physique)*. Abidjan (Cote d'Ivoire), 2021.
- Moumouni, S., R. Kiki, et T. Vischel.** « Tendances des indices des extrêmes pluviométriques au Bénin, de 1955 à 2016 ». In *TACCOVAR (Tropical Atlantic Climate and COastal VARIability)*. Cotonou (Bénin), 2021.
- Peugeot, C., V. Wendling, M. Grippa, et al.** « Looking for feedback loops in the critical zone ». In *Advancing Critical Zone science. First OZCAR TERENO International Conference*, 181-82. Strasbourg (France), 2021. <https://ozcartereno2020.sciencesconf.org/resource/page/id/27>.
- Roger, C., O. Fovet, I. Braud, M. Grippa, **B. Hector**, et al. « Which hydrological signatures of intermittence of rivers and streams in order to identify causes and ecological impacts ? » In *Advancing Critical Zone science. First OZCAR TERENO International Conference*, 297-98. Strasbourg (France), 2021. <https://ozcartereno2020.sciencesconf.org/resource/page/id/27>.
- Sossou, L., Peugeot, C., Lawin, A. E., and Johannet, A.**: « Prévion des risques de crues du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bonou par modèles à réseaux de neurones ». In *4th Int. Conf. of the Great Rivers of Africa*. Cotonou, Bénin, 2021.
<https://friendgrandsfleuvesafriquecotonou2020.org/friend/>.
- Wendling, V., C. Peugeot, M. Grippa, G. Panthou, J.-L. Rajot, O. Mora, A. Garcia Mayor, E.A. Lawin, Bouzou Moussa I, Ba A. and the Tiphyc team.** « Assessing hydrological regime shifts through system-dynamics modeling ». In *Advancing Critical Zone science. First OZCAR TERENO International Conference*, 371-72. Strasbourg (France), 2021.
<https://ozcartereno2020.sciencesconf.org/resource/page/id/27>.

2020

Les colloques initialement prévus ont tous été annulés pour cause de covid. Ils sont généralement reportés en 2021 :

- 24th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Šibenik, Croatie (2 participantes)
- 4ème Conférence internationale des grands fleuves d'Afrique, Cotonou, Bénin (3 participants)
- Colloque international francophone GEOFCAN, Grenoble, France (1 participant invité)
- Journées Scientifiques Internationales de Lomé XIXème édition, Lomé, Togo (1 participant)

Thèses

En cours ¹⁰

ADEOTAN Younaïse Sounkanmi Olouwachéyi (1ère année) Évaluation des ressources en eau souterraine dans le socle du Burkina Faso : apport pour la couverture universelle en eau potable. Thèse de doctorat 2iE, Burkina Faso. Encadrants: **JM Vouillamoz** (IRD) et M Koita (2iE)

AKPONI Fulgence (démarrage 2020) : « Estimation quantitative de la pluie, à partir des données simulées des radars météorologiques, par les méthodes d'optimisation des heuristiques ». Encadrant : **S. Moumouni**

BODJRENOU René (démarrage 2020). « Impacts des changements climatiques et d'utilisation des terres sur les ressources en eau du delta de l'Ouémé ». Thèse de Doctorat, Univ. Abomey-Calavi, ED Sciences Agronomiques et de l'Eau. Bourse OMI-Delta. Co-direction : **E. Lawin, J-M Cohard**.

CHAGNAUD Guillaume (démarrage 2019) : « Evolution de l'aléa pluviométrique au Sahel: tendances récentes et futures ». Thèse de Doctorat, Univ. Grenoble Alpes, Bourse MESRI, Encadrant : **G. Panthou, T. Vischel**

HOUNSINO Miriam (démarrage 2019). « Gap filling of turbulent fluxes and estimation of their uncertainties ». Thèse de Doctorat, Univ. Abomey-Calavi, ED Institut de Mathématiques et de Sciences Physiques. Bourse DE. Co-direction : **B. Kounouhewa, O. Mamadou**.

KIKI Roland (démarrage 2021) : « Analyse statistique des paramètres climatiques au Bénin de 1955 à 2016 : caractéristiques globales et changements spatio-temporel ». Encadrant : **S. Moumouni**

KOUKPOHOUNSI, Bénito (démarrage 2019). « Evaluation de la recharge et des stocks d'eau souterraine dans le delta de l'Ouémé : implication pour l'AEP ». Thèse de Doctorat, Univ. Abomey-Calavi. Bourse OMI-Delta. Co-direction : **N. Yalo, J-M. Vouillamoz**.

SAUZEDDE Elisa, (démarrage 2021) : « Gestion des risques hydrologiques dans un contexte de changements climatiques et environnementaux dans la région du Sahel ». Thèse de Doctorat, Univ. Grenoble Alpes, Bourse CIFRE. Encadrants : **G. Panthou, T. Vischel**

SOSSOU Luc (démarrage 2020). « Prévision des risques de crues du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bonou par modèle à réseaux de neurones ». Thèse de Doctorat, Univ. Abomey-Calavi, ED : Sciences Exacte et Applications, en cours. Bourse IRD-ARTS. Co-direction : **E. Lawin, C. Peugeot**.

Soutenues 2021-22

ADJIKPE Loïc S. « Modélisation des distributions granulométriques des gouttes de pluie observées au Nord-Ouest du Bénin : analyse de l'impact de leur pas de temps d'intégration sur leur

¹⁰ Doctorant dont le travail s'inscrit à plus de 25% dans le LMI REZOC (en moyenne 75%)

structuration et leur paramétrisation par le taux de pluie ». Encadrant : **S. Moumouni**. Thèse ayant reçu l'avis favorable des rapporteurs, date de soutenance prévue : 16 Février 2022

YAROU Halissou « Variabilités climatiques et dynamiques des événements hydrométéorologiques dans le bassin béninois du fleuve Niger », Thèse de Doctorat, Univ. Abomey-Calavi, Cotonou (Bénin), 141 pp., 2021. Encadrant **E. Alamou**.

Soutenues 2020

Hounguè, Rita (2020). « Climate change impacts on hydrodynamic functioning of Oueme delta (Benin) ». Thèse de Doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin, WASCAL. Direction : **E. Lawin**.

Master

On ne recense ici que les masters financés par le LMI REZOC (gratification de stage ou missions ou matériel). Au Bénin les Masters peuvent se dérouler sur 2 années.

En cours

AGON Orel, 2020-2021. « Evaluation du rôle de la fracturation dans l'alimentation des forages d'eau en zone de socle ». Mémoire de Master « Hydrologie et Gestion des Ressources en Eaux », à l'UAC. Encadrants : **N. Yalo, C. Allé et J-M Vouillamoz**.

DOSSOU, Raoul, 2020-2021. « Contribution de l'hydrogéochimie à la définition des conditions aux limites du plateau d'Allada en vue de l'élaboration d'un modèle hydrodynamique ». Mémoire de Master, Univ. Abomey-Calavi, 2020. Encadrants **A. Alassane, V. Kotchoni et J-M. Vouillamoz**.

HOUNSOU GANYE S. Maurelle, 2021. "Altération du signal piézométrique annuel de recharge en fonction de la profondeur au niveau de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada". Stage de M2 génie rural. Encadrants **J-M. Vouillamoz et F. Lawson**.

MAGNON Linda, 2021. "Origine et atouts de l'artésianisme en zone de socle au Bénin ". Stage de M2 génie rural. Encadrants **J-M. Vouillamoz et F. Lawson**.

SINABARIGUI, Idrissou, 2020-2021. « Modélisation du fonctionnement et de la valorisation des bas-fonds en zone soudaniens ». Mémoire de Master MAREMA, Univ. Abomey-Calavi, Encadrants **L. Sintondji et J-P Vandervaere**

Soutenus 2021

AÏKPE D. Mulk, 2021. "Comparaison de linéaments tracés en zone de socle du Bénin à partir de traitements d'images Landsat et SRTM". Sage de M2 génie rural. Encadrants **J-M. Vouillamoz et F. Lawson**.

Allagbè, Thomas D'Aquin « Estimation des pluies maximales probables au Bénin ». Encadrant : **S. Moumouni**

Finck, Jean-Sébastien. « Extraction des linéaments de la zone de socle ouest-africaine à partir d'images satellite à haute résolution : application à la commune de Savalou (Bénin) ». Mémoire de M1 Science de la Terre et des Planètes Environnement mention « Atmosphère, Climat et Surfaces Continentales », Univ. Grenoble Alpes, 2021. Encadrants **J-M. Vouillamoz et F. Lawson**.

LAWSON, James, 2021. « Contribution à la définition de la géométrie de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada : comparaison des sondages électrique et EM en domaine temporelle ». Mémoire de Master, Univ. Abomey-Calavi, 2020. Encadrants **N. Yalo, F. Lawson et J-M. Vouillamoz**.

Soutenus 2020

KIKI Gino Roland, 2019-2020. Analyse des tendances des variables climatiques historiques. Stage de Master « Hydrologie quantitative ». Encadrants **M. Soumaila et T. Vischel**

NOUMON Arthon, 2019-2020. Analyse de la variabilité interannuelle du bilan énergétique et de l'évapotranspiration réelle sur un site de culture au Nord Bénin. Stage de Master « Physique Théorique et Applications ». Encadrants **O. Mamadou et J-M. Cohard**.

Formation et communication

Vandervaere, J-P, Y. M'Po N'Tcha, F. Dovonou, et N. Yalo, 2021. « Première Ecole de Terrain du LMI REZOC et du Centre d'Excellence C2EA : bilan de la phase de mesures des étudiants, ferme-école de Sain, 16 au 18 sept 2021 ». Rapport du LMI REZOC. Cotonou, Bénin, 5p.

Rapport budgétaire 2021

En 2021 les ressources totales du LMI REZOC s'élèvent à 71 000 €, dont 50 000 € proviennent de la dotation IRD pour le LMI (dont 10000 € reprogrammation de 2020) et 21 000 € d'autres financements (voir ci-dessous) obtenus par les membres du LMI.

En 2021 les dépenses du LMI REZOC se sont élevées à 65 000 €. Le LMI a demandé la reprogrammation de 6000 € sur 2022 car certaines de ses activités ont été annulées à cause du COVID.

1) ressources du LMI REZOC en 2020

Tutelles du LMI	
IRD (dotation LMI)	50 000 €
IRD (autres crédits)	10 500 €
INE - Bénin	500 €
UMR IGE - France	*
UMR HSM - France	*
DG-Eau - Bénin	0 €
<i>UAM - Niger</i>	<i>pas en activité pendant les 3 premières années</i>
<i>USTTB - Mali</i>	
<i>UMR GET - France</i>	
TOTAL	61 000 €

* : crédits intégrés dans "IRD (autres crédits)"

Financements extérieurs	
projets (OMI-Delta, AGIRES, Centre d'excellence C2EA)	9 000 €
observatoire AMMA-CATCH	0 €
bourses de colloques	1 000 €
TOTAL	10 000 €

TOTAL Tutelles + extérieurs	71 000 €
------------------------------------	-----------------

2) Détail des dépenses 2021 du LMI REZOC

Rubrique	Description	2021	Dont LMI
Gouvernance et animation			
	Atelier de travail – annulé cause covid	0 €	
	Total €	0 €	0 €
Fonctionnement et petits équipements			
	Equipement hydrologique (limnimètres, pluviomètres, piézomètres)	400 €	400 €
	Bureautique (ordinateurs, imprimantes)	15 200 €	14 000 €
	Logiciel	0 €	0 €
	Données Météo-Bénin	300 €	300 €
	Frais infrastructure (locaux et internet)	1 900 €	1 900 €
	Papeterie et divers	1 400 €	1400 €
	Total €	19 200 €	18 000 €
Formation			
	Stages de master (5)	3 500 €	3 500 €
	Ecole de Terrain	5 800 €	3 500 €
	Total €	9 300 €	7 000 €
Missions			
	Conférences scientifiques	7 900 €	0 €
	Mission Bénin -> France	17 500 €	11 500 €
	Mission France -> Bénin	1 800 €	1 800 €
	Mission Bénin-Bénin (terrain)	2 600 €	1 500 €
	Mission vers les bailleurs	2 200 €	2 200 €
	Total €	32 000 €	17 000 €
Autres activités			
	CDD Secrétariat Gestion	4 200 €	2 000 €
	Total €	4 200 €	2 000 €
TOTAL		65 000 €	44 000 €

Le LMI a demandé le report des 6000€ non dépensés pour cause de Covid sur le budget 2022.

ANNEXE 1



LMI REZOC : formulaire de demande de données de Météo-Bénin¹¹

Je soussigné, membre du LMI REZOC, demande à utiliser les données de Météo Bénin détaillées ci-dessous dans le cadre du LMI REZOC « Centre d'étude des ressources en eaux et de la zone critique ».

Je m'engage à utiliser ces données à un usage exclusif de recherche. Si Météo-Bénin découvre que ces données ont été utilisées pour une consultation, l'Agence Météo-Bénin est en droit de me traduire en justice et l'utilisateur illégal fera face à la rigueur de la loi.

Je m'engage à remercier le LMI REZOC et Météo-Bénin dans toute publication utilisant ces données.

Je m'engage à ne pas transmettre ces données, y compris aux membres du LMI. Chaque utilisateur doit signer ce formulaire.

NOM :

Prénom :

Axe du LMI REZOC :

Usage des données :

Données demandées:

Variable :

Années :

Stations :

Fait à :

Le :

Nom et signature
du demandeur

Nom et signature
du responsable d'axe

Nom et signature
du directeur du LMI

¹¹ Formulaire à envoyer au secrétariat du LMI REZOC : Rolande Lawin <rolande.lawin@ird.fr>