



Rapport de Stage 2A

Programme de Recherche
AMMA au Bénin

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	3
I. INTRODUCTION	4
II. PRESENTATION DU PROJET AMMA	5
1. INTRODUCTION : SPECIFICITES CLIMATIQUES DE L'AFRIQUE DE L'OUEST	5
<i>a. Variabilité climatique</i>	5
<i>b. Fonctionnement hydrologique</i>	5
2. LE PROJET AMMA	6
<i>a. Les motivations et objectifs</i>	6
<i>b. L'approche pluri-disciplinaire</i>	6
<i>c. Les échelles spatiales</i>	6
<i>d. Répartition temporelle</i>	8
III. LE TRAVAIL DE TERRAIN	9
1. TOURNEE DES APPAREILS DE MESURE HYDROLOGIQUE	9
<i>a. Les pluviographes</i>	9
<i>b. Les limnimètres et piézomètres</i>	13
2. TOURNEE DE JAUGEAGE	15
IV. TRAITEMENT DES DONNEES	17
1. PARTIE PLUVIOMETRIE	17
<i>a. Les logiciels</i>	17
<i>b. Le rapport de campagne</i>	21
2. SUIVI DES FLUX D'EVAPOTRANSPIRATION	22
<i>a. Les sites</i>	22
<i>b. Le principe de la mesure</i>	23
<i>c. L'instrumentation</i>	26
<i>d. Traitement des données de terrain</i>	26
V. CONCLUSION	30

Remerciements

Je voudrais d'abord remercier ceux qui m'ont permis de concrétiser ce projet de partir travailler hors de France le temps d'un an et d'atterrir en terre inconnue, au Bénin. A savoir : Thierry Lebel, directeur du LTHE, qui a accepté ma candidature, Sylvie Galle, chercheuse au LTHE ayant passé trois ans au Bénin et suivant maintenant le projet depuis la France, qui a pris le temps de m'expliquer l'histoire du projet, la situation au Bénin, et le travail qui m'attendait. Je remercie également les chercheurs Christophe Peugeot et Luc Seguis qui m'ont accueilli au sein de leurs équipes de travail lors des différentes missions de terrain, Marielle Gosset que j'ai rencontrée en France et qui a assuré le suivi de la partie pluviométrie, et plus particulièrement Jean-Martial Cohard qui m'a formé au traitement spécifique des données de flux.

Une pensée également pour mon prédécesseur, Léandro Suarez, qui a pris le temps de me former au travail, de m'aider dans mes démarches en arrivant, et même de m'héberger pendant le premier mois.

Bien sur, mon esprit va à toute l'équipe de travail : Simon Afouda alias « Le Malade », avec qui j'ai partagé mes deux premières tournées de terrain, Théodore Ouani, Patrick Martine et Maxime Wubda avec qui la bonne ambiance tant sur le terrain que dans les bureaux est assurée.

I. Introduction

Je tiens tout d'abord à préciser que ce stage s'inscrit pour moi dans un projet d'année de césure effectuée au Bénin. En effet, j'ai décidé cette année de profiter du système proposé par la scolarité d'HMG afin de mettre en application pendant un an ce que j'ai pu apprendre sur les bancs d'école, tout en m'immergeant pour la première fois dans une culture d'Afrique de l'Ouest.

Je suis dans le département Génie Hydraulique et Ouvrage de mon école, mais cela m'intéressait de profiter de cette année pour approfondir mes connaissances en hydrologie et découvrir le monde de la recherche, laissant le génie civil hydraulique pour mon stage de fin d'études. J'ai donc pris contact avec le LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement) de Grenoble, rattaché à l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) qui prend part à un programme de recherche en Afrique de l'Ouest : le projet AMMA, Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine. En effet, je savais que ce projet mène actuellement une phase de prise intensive de données dans le cadre d'un Service d'Observation (SO) de l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers) et que pour ce faire ils proposent des postes de Volontaire International (V.I.) aux ressortissants français d'école d'ingénieur. Ma candidature a été acceptée et je suis arrivé au Bénin début juillet pour une durée de un an pour le SO AMMA-CATCH, rattaché à l'implantation de l'IRD à Cotonou (voir annexe 1).

Un Service d'Observation se doit d'assurer des données régulières et de bonne qualité. Ma place dans ce projet se situe à deux niveaux: le travail de terrain et le travail de bureau. Le travail de terrain permet de récupérer périodiquement les données, contrôler les appareils mis en place et régler les différents problèmes techniques pouvant survenir. Cette étude est couplée à un travail de bureau qui consiste principalement à la critique et au traitement de données avec une pré-analyse de deux variables : la pluviométrie et l'évapotranspiration dans la partie nord du Bénin. Des rapports de campagne annuels sont rédigés afin de fournir un retour sur l'état du réseau au cours de l'année écoulée.

II. Présentation du projet AMMA

1. Introduction : spécificités climatiques de l'Afrique de l'Ouest

a. Variabilité climatique

L'Afrique de l'Ouest est caractérisée par une grande variabilité du régime de précipitation. Une illustration dramatique de ce phénomène est l'importante sécheresse des décennies 70 et 80, que ce soit en zone sahélienne ou soudanaise, qui a provoqué le tarissement ou la baisse des écoulements de nombreux cours d'eau. La modification climatique est due à des perturbations de la mousson d'Afrique de l'Ouest, source pluviométrique majeure de ces zones. Les variations interannuelles sur cette période, avec des années extrêmement sèches, accentuent encore les conséquences dramatiques de ce phénomène sans précédent en Afrique de l'Ouest, sur l'agriculture, l'eau et la santé.

b. Fonctionnement hydrologique

Les régions sahéliennes sont caractérisées par des écoulements principalement hortonien (Horton, 1933) du fait de sols peu couverts imperméables et encroûtés avec des pluies de fortes intensités.

Si la baisse de la pluviométrie moyenne avant et après 1970 varie d'environ 15% à 30% selon la zone (Le Barbé et Lebel, 1992; Lebel et al. in press), les débits moyens des grands fleuves de la région (Niger, Sénégal) ont connu des variations concomitantes plus prononcées, à savoir une baisse moyenne de 40 à 60% des débits. Au Bénin, les pluies ont baissé d'environ 15% (Le Lay et Galle, 2005) et les écoulements des rivières ont pour leur part diminué d'environ 40% (Le lay 2006).

Les questions relatives au rechargement des nappes souterraines se posent également, notamment vis-à-vis de la disponibilité future en eau potable pour les populations, dont la demande est sans cesse croissante.

2. Le projet AMMA

a. Les motivations et objectifs

Le programme de recherche international AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) à été lancé afin de mieux comprendre les mécanismes de la mousson d'Afrique de l'Ouest. Il s'agit d'expliquer les interactions entre l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère. L'objectif du projet est dans un premier temps la compréhension des mécanismes de la mousson et de ses variations à différentes échelles temporelles, ainsi que l'évaluation des impacts de sa variabilité sur les ressources en eau, l'agriculture et la santé, à différentes échelles spatiales.

b. L'approche pluridisciplinaire

Une approche pluridisciplinaire est envisagée pour répondre à ces objectifs. Elle se décline en plusieurs points :

- ✓ Réalisation de recherches détaillées sur les processus physiques et chimiques influençant le système couplé terre-océan-atmosphère en Afrique de l'Ouest. Le but est de quantifier les interactions au sein de ce système et leurs impacts sur le climat local, régional et global afin d'améliorer les prévisions météorologiques, par exemple pour produire des scénarios de changement climatique.
- ✓ Caractérisation de l'impact de la variabilité climatique du climat de l'Afrique de l'Ouest sur les ressources en eau, la sécurité alimentaire, la santé et les stratégies de développement. Il faut également inclure l'étude de la rétroaction des activités humaines et notamment le changement d'occupation des sols sur la variabilité du climat.
- ✓ Implémentation d'un réseau intégré de mesures multi-échelles fournissant les paramètres clefs nécessaires à une recherche scientifique multidisciplinaire.
- ✓ Développement d'activités intégrées de formation et d'éducation pour les institutions techniques et de recherche en Afrique.
- ✓ Mise en place d'une méta-base et de bases de données se focalisant sur les thèmes du projet dans le but d'un archivage à long terme.

c. Les échelles spatiales

Les mécanismes de la mousson d'Afrique de l'Ouest font intervenir des processus à des échelles spatio-temporelles très variées, caractéristiques des couplages entre dynamique atmosphérique, cycle hydrologique, et dynamique de la végétation. Ainsi le projet AMMA met-il en œuvre une stratégie d'observation multi-échelle.

Tout d'abord, une fenêtre sous-régionale s'étendant du Bénin au sud au Mali au nord permettant d'étudier en détail les variabilités pluviométriques et hydrologiques sur une région couvrant le gradient climatique d'Afrique de l'Ouest (figure 1).

Viennent ensuite trois sites de méso-échelle instrumentés pour des études hydrologiques plus fines et pour le suivi de la végétation (figure 1) :

- ✓ Le Gourma Malien (30 000 km², 15°N - 17°N) sur lequel les premières études de végétation remontent à 1982 avec une pluviométrie annuelle d'environ 300 mm,
- ✓ Le degré carré d'HAPEX-Sahel (the Hydrology-Atmosphere Pilot Experiment in the Sahel), au Niger suivi depuis 1990, (10 000 km², 2°E - 3°E; 13°N - 14°N) avec une pluviométrie moyenne annuelle de 500 mm environ,
- ✓ Le haut bassin de l'Ouémé (14 000 km²), au Bénin, suivi depuis 1997, s'étendant sur un degré de longitude (9°N - 10°N) et caractérisé par un climat soudanien avec une pluie moyenne annuelle dépassant 1000 mm.

Ces trois sites ont reçu le label d'ORE (Observatoire de recherche en Environnement) délivré par le ministère français de la recherche sous le nom ORE AMMA-CATCH (CATCH pour Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du cycle Hydrologique) et le label de Service d'Observation par l'INSU (2005).

A l'intérieur de ces sites, des super-sites d'une centaine de km² sont équipés plus densément, notamment pour des études de flux à l'interface sol-atmosphère et de fermeture du bilan hydrique. Outre les mesures de base qui constituent l'ossature des sites de méso-échelle (pluie, écoulements de surface, hauteur des nappes), ces sites intensifs sont équipés de stations météorologiques, de mesures d'humidité des sols et, à compter de 2005, de mesures des flux turbulents de chaleur sensible et de H₂O/CO₂.

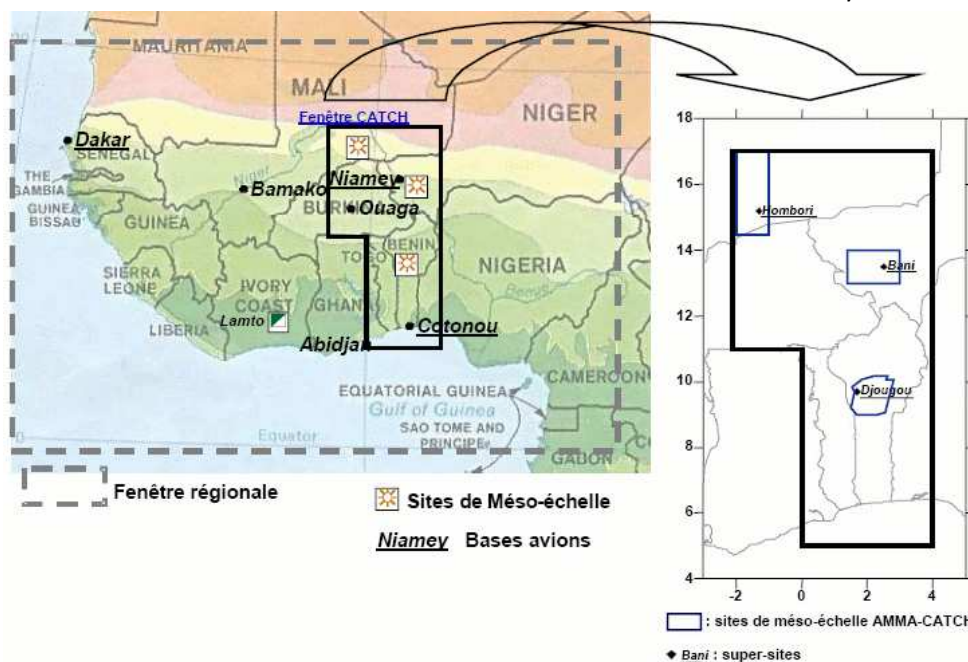


Figure 1 : Sites d'observation implantés selon un gradient d'aridité croissant : le bassin supérieur de l'Ouémé au Bénin, le bassin du Kori au Niger et le Gourma malien.

d. Répartition temporelle

En termes temporels, les observations sont réparties en trois périodes (figure 2) :

- ✓ Une période d'observations à long terme (LOP), destinée à documenter les variations interannuelles,
- ✓ La période d'observations renforcées (EOP, 2005-2007), conçue pour documenter sur un transect climatique le cycle annuel des processus de surface et atmosphériques, et les mémoires interannuelles,
- ✓ Enfin, la période d'observations spéciales (SOP, 2006) en dédiée aux observations détaillées des processus spécifiques aux 3 phases principales de la saison des pluies : début de mousson, maximum de mousson et retrait de la mousson, avec le déploiement de moyens de recherche lourds (avions, bateaux, radars, ...).

L'année 2008 se situe donc après la période d'observations renforcées, mais les sites sont encore équipés et une équipe minimum est maintenue afin d'assurer la récupération des données et le bon fonctionnement des réseaux d'appareils de mesure.

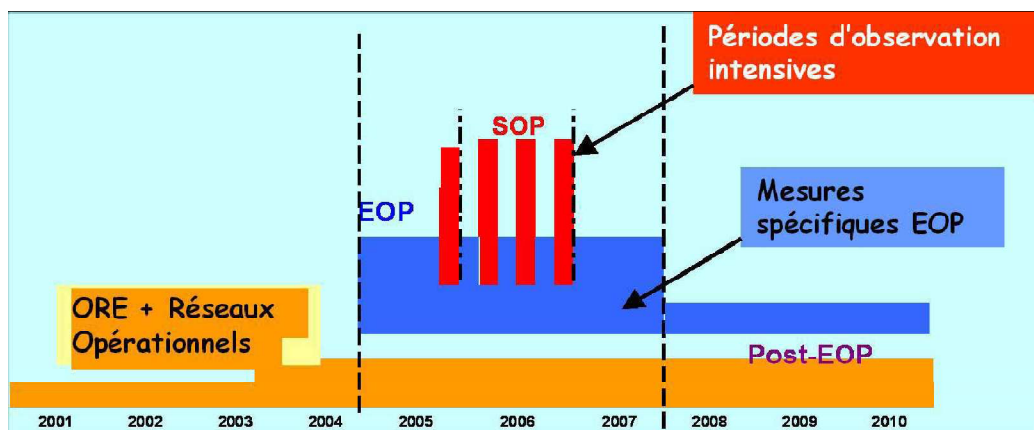


Figure 2 : Périodes d'observation

III. Le travail de terrain

Au cours de mes trois premiers mois de travail, j'ai eu l'occasion d'effectuer deux tournées de terrain. La première concernait le relevé des données des appareils de mesures hydrologiques de l'OHHVO et la seconde consistait à effectuer des jaugeages dans les rivières. Des missions régulières de 15 jours sont effectuées tous les mois, auxquelles s'ajoutent les missions exceptionnelles d'installation, de désinstallation ou de déplacement d'appareils de mesure.

1. Tournée des appareils de mesure hydrologique

Cette tournée de terrain consiste à récupérer les données des 56 pluviographes installés au niveau de l'OHHVO, ainsi que toutes les données des appareils limnimétriques et piézométriques installés dans les rivières et dans les puits. Elle dure 15 jours, la base de travail est située à Djougou et on sillonne ensuite la région pour passer sur tous les appareils.

a. Les pluviographes

Les pluviographes sont les appareils de mesure de la pluie, point d'entrée du cycle hydrologique étudiée. Leur nombre (56) et leur répartition permet une bonne couverture des champs pluvieux horaires. En effet on sait que la distance de décorrélation des pluies journalière est de 80 km et les pluies horaires de 20 km (Lawin, 2007). La densité des pluviomètres est fonction des objectifs et des moyens disponibles. Ils sont disposés de telle sorte à couvrir le plus uniformément possible les 14000 km² du bassin versant étudié, avec une densité particulière au niveau du bassin de la Donga, super-site de mesure.

Le réseau national Météorologique du Bénin dispose de pluviographes à tambour munis d'une recharge papier et d'un stylet qui permettent d'écrire les basculements. Le programme AMMA a testé une dizaine de pluviographes à pesée. Equipés d'une balance, ils effectuent un enregistrement de l'heure et du poids à pas de temps et de poids fixes et définis. Mais ces appareils se sont montrés inadaptés à la zone d'étude car ils sont sensibles au vent qui accompagne les pluies dans ces climats et créent des tourbillons qui faussent les données, de plus le matériel était inadapté aux fortes chaleurs de ces régions.

A l'heure actuelle, nous n'avons conservé que des pluviographes à augets basculeurs (figure 3) qui enregistrent à la seconde près sur une carte magnétique les dates et heure de basculement des augets. Chaque basculement d'auget correspond à un volume de 20 cm³ ou 20ml qui, rapporté à la surface de captation de la pluie de 400cm², traduit une lame d'eau de 0,5 mm. Chaque appareil est ensuite équipé d'un bidon connecté aux augets par un tuyau et permettant de recueillir l'eau, le volume recueilli constitue ce que l'on appellera par la suite le cumul seau. Il permet de vérifier si le nombre de basculements enregistré est bien égal à

la quantité d'eau dans le seau. De plus, la dualité des enregistrements et du seau diminue les risques de perte totale des données en cas de dysfonctionnement d'un des deux systèmes.

La nouveauté pour cette année réside dans l'utilisation de cartes magnétiques munies de système d'acquisition des données par infrarouge. Mais ces appareils posent à l'heure actuelle quelques problèmes (fiabilité, résistance au soleil,...) et demandent encore à faire leurs preuves.

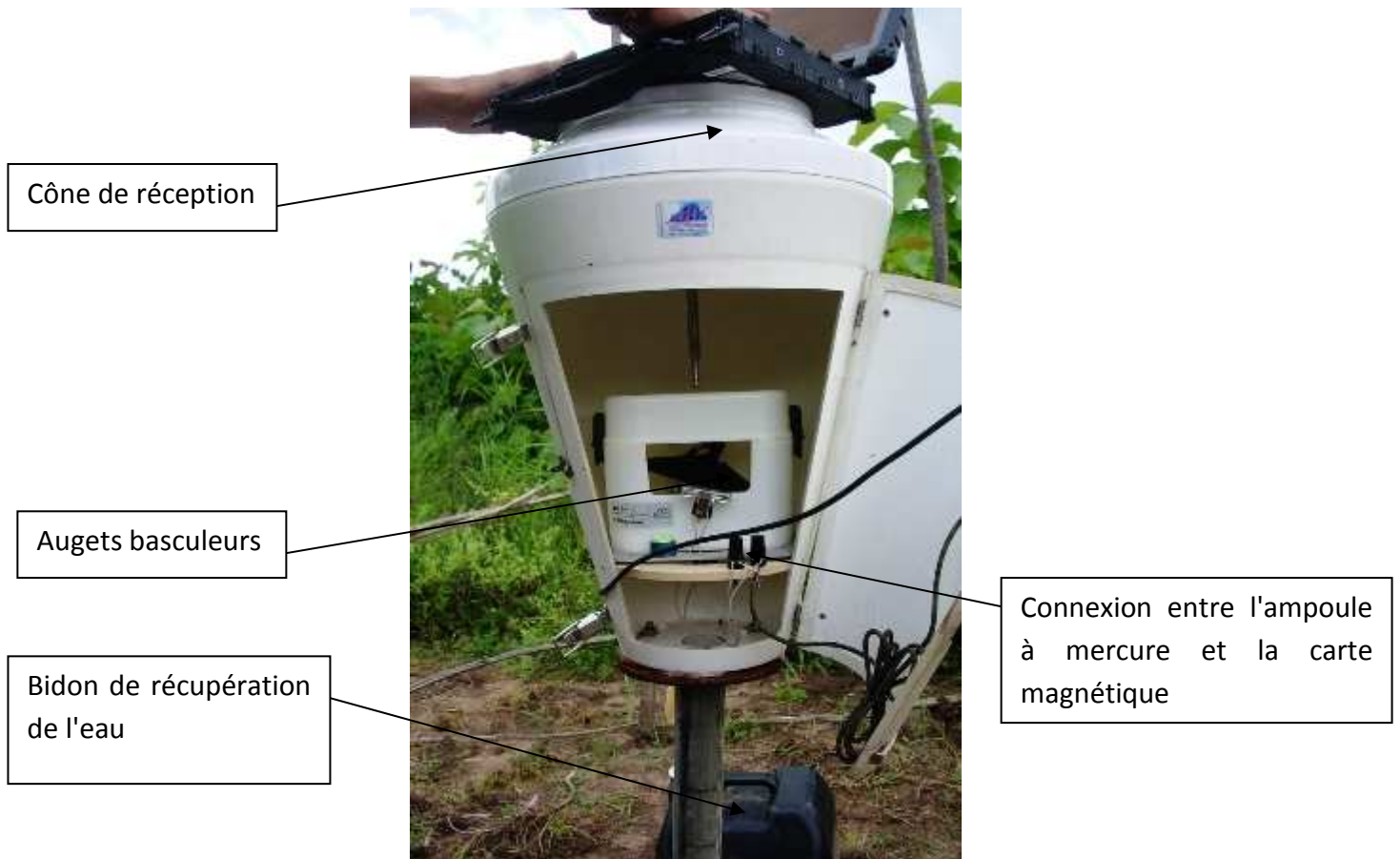


Figure 3 : Pluviographe à auget basculeur

Notre travail sur ces appareils consiste principalement en trois axes :

- ✓ La récupération des données,
- ✓ La vérification de tout le système (concordance entre les enregistrements et le cumul seau, état mécanique, état électrique,...),
- ✓ La remise en état le cas échéant.

Récupération des données

La récupération des données se fait à l'aide de l'ordinateur de terrain. On utilise le logiciel BoxCarePro pour les cartes à connexion filaire et le logiciel HoboWare pour les nouveaux systèmes de carte avec acquisition infrarouge.

A cette étape, toutes les informations recueillies sont notées dans un cahier afin d'en sauvegarder une copie en cas de problème avec l'ordinateur. On relève également l'heure de

l'appareil et l'heure GPS, ceci permet de remonter à une éventuelle dérive temporelle de l'appareil et à posteriori de recalibrer les dates des enregistrements en conséquence lors du traitement des données.

Le principal problème mécanique rencontré est l'entonnoir ou le pluviomètre bouché. Par contre, toutes les données ne sont pas perdues, il s'agit ensuite d'estimer à partir de quand l'appareil est bouché et de conserver toutes les données qui précèdent. Les problèmes liés à des impossibilités de connexion entre la carte et l'ordinateur sont beaucoup plus graves car notre marge de manœuvre pour y remédier est moins grande et ici la totalité des enregistrements est perdue.

Le tableau suivant dresse une liste exhaustive des problèmes rencontrés sur les 56 pluviographes de la zone d'étude en 2008 et pouvant mener à une perte partielle ou totale des données (tableau 1) :

Type de panne	Nombre de pannes	Nombre de jours	% de panne selon la durée
Déconnexion du seau	21	687	38.7
Petit entonnoir bouché	9	183	10.3
Pluviographe bouché	9	154	8.7
Pas d'enregistrement	8	268	15.1
Hobo arrêté	4	42	2.4
Récupération données impossible	4	110	6.2
Mauvais paramétrage	3	107	6.0
Données enregistreur incohérentes	2	43	2.4
Problème pile	2	60	3.4
Augets bloqués par les guêpes	1	32	1.8
Seau percé	1	34	1.9
Ampoule à mercure dessoudée	1	26	1.5
Mécanisme bloqué	1	30	1.7
Total	66	1776	100

Tableau 1: Liste des problèmes rencontrés sur les pluviographes en 2008 sur le site AMMA-CATCH-Bénin

Vérification du système et remise en état

Tout d'abord, on regarde la concordance entre le nombre d'enregistrements et le cumul seau. Si tel n'est pas le cas et que le seau ne présente pas de problèmes, alors il faut refaire le réglage des augets. On utilise une pipette jaugée de 20 ml, qui correspond au basculement d'un auget, pour vérifier leur bon fonctionnement. Après chaque réglage, on étudie le comportement du système sur un nombre plus important de basculements afin de connaître avec précision la calibration des augets, c'est le test des 8 mm.

On vérifie également la propreté du système. Il est fréquent que le cône de réception ou le cône d'amenée sur les augets soient bouchés par de la poussière ou des insectes. Il s'agira plus tard d'évaluer la gravité du dysfonctionnement (cône rempli ou pas, cumul seau correct ou pas...).

Avant de partir, on vérifie l'état de la pile et la bonne connexion entre tous les éléments du système.

Matériel de terrain

Ci-dessous, le matériel de terrain nécessaire au relevé des pluviographes (figure 4) ainsi que son utilité (tableau 2) :



Figure 4 : Matériel nécessaire pour le relevé des stations pluviographiques

Matériel	Utilité
Pipette 20 ml	20 ml \equiv 0.5mm de pluie \equiv 1 basculement
Eprouvette 2 l	2 l \equiv 50mm de pluie ; pour la mesure du cumul seuu
Eprouvette 320 ml	320 ml \equiv 8mm de pluie ; pour la calibration de augets et affiner le relevé du cumul seuu
Bidon de calibration	Permet un écoulement lent lors de la calibration des augets
Voltmètre	Mesure de la tension de la pile pour savoir s'il faut la changer
GPS	Comparaison de l'heure du système d'acquisition à l'heure GPS pour remonter à la dérive temporelle des appareils
Tournevis à auget	Réglage des augets dérèglés

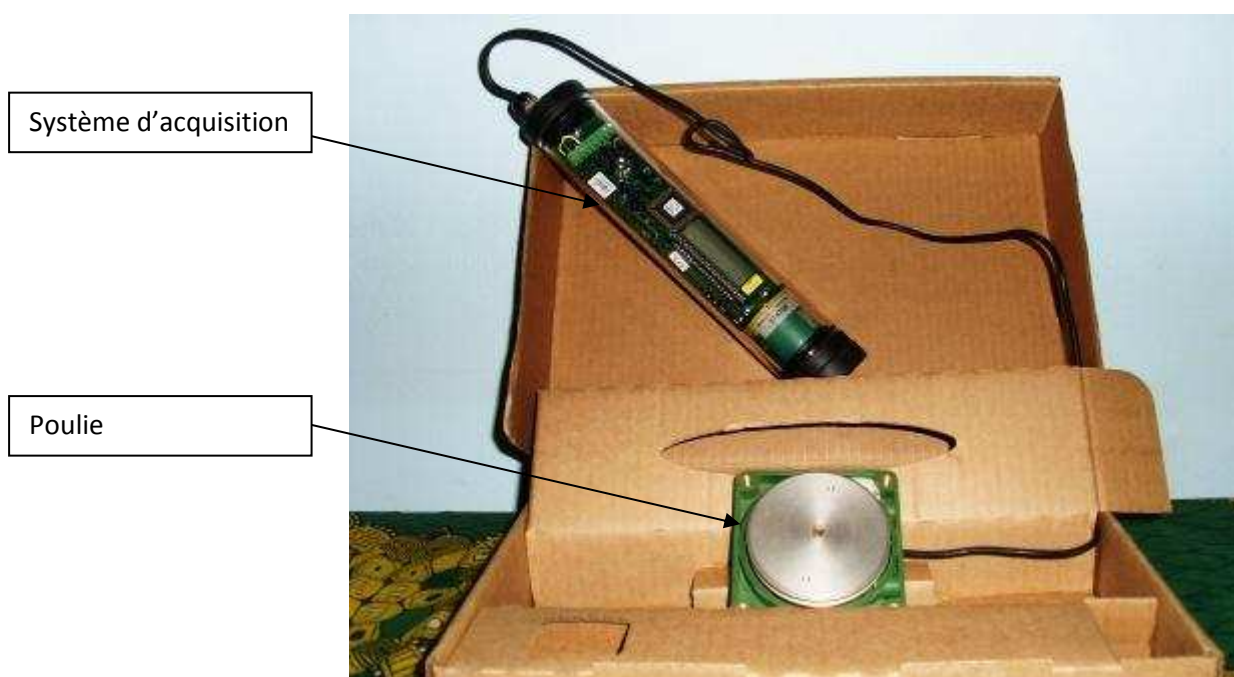
Tableau 2 : Description du matériel nécessaire pour le relevé des stations pluviographiques

b. Les limnimètres et piézomètres

Des mesures de hauteur d'eau sont effectuées en parallèle dans les rivières et dans les puits, pour connaître l'évolution des eaux de surface et des eaux souterraines. De même, des mesures de conductivité et de température permettent de remonter à la nature des eaux (eau de pluie ou souterraine).

Les appareils de mesure de hauteur d'eau sont principalement des Thalimèdes (figure 5). Installés dans une conduite en PVC percée à sa base, ils sont munis d'une poulie, d'un flotteur et d'un contrepoids et enregistrent à travers le mouvement de la poulie les hauteurs à un pas de temps prédéfini (de 5 à 15 minutes dans la plupart des cas). On mesure à chaque passage la conductivité et la température de l'eau (figure 6) pour vérifier l'exactitude des données. D'autres sondes plus complètes permettent de calculer la pression, la conductivité, la température en fonction du paramétrage (Sollinst, Hydreka).

Pour pallier à d'éventuels problèmes techniques, des lecteurs habitant dans les villages à proximité sont payés pour noter régulièrement (une à trois fois par jour) la hauteur d'eau à l'échelle d'une rivière ou la profondeur d'un puits à l'aide d'un décimètre, et/ou la conductivité.



Le mode opératoire est assez similaire à celui des pluviographes. On récupère les données et vérifions l'état du système (poulie bloquée, pile HS, ...). On effectue le paramétrage de l'appareil si nécessaire avec la date et l'heure GPS, puis la côte à l'échelle dans le cas des rivières et la profondeur relevée avec la sonde dans le cas des puits (figure 6).



Figure 6 : Puisette pour la mesure de conductivité et température & Sonde sonore pour la mesure de hauteur d'eau des eaux souterraines (puits) et de surface (rivières)

2. Tournée de jaugeage

Cette tournée de terrain consiste à effectuer des mesures de débit dans les rivières des bassins étudiés. Ces mesures de débit sont corrélées aux mesures de hauteur d'eau afin d'obtenir une courbe de jaugeage de la rivière. Par la suite, la simple mesure de la hauteur d'eau permettra de remonter au débit.

L'appareil utilisé pour cette tournée est appelé ADCP (figure 7). Restant à la surface de l'eau, il permet de mesurer le profil de la section considérée ainsi que les vitesses d'écoulement, on remonte ainsi au débit par intégration des vitesses sur la section.

On utilise différentes méthodes pour mener à bien cette opération :

- ✓ Quand les lieux le permettent, l'appareil est tenu par une corde et déplacé d'une rive à l'autre à partir d'un pont (figure 8),
- ✓ S'il n'y a pas de pont ou bien que les piles du pont perturbent trop l'écoulement, on utilise un zodiac afin de faire les traversées (figures 9 et 10).

Cette tournée me concerne toutefois moins directement car je ne suis pas en charge du traitement des données.

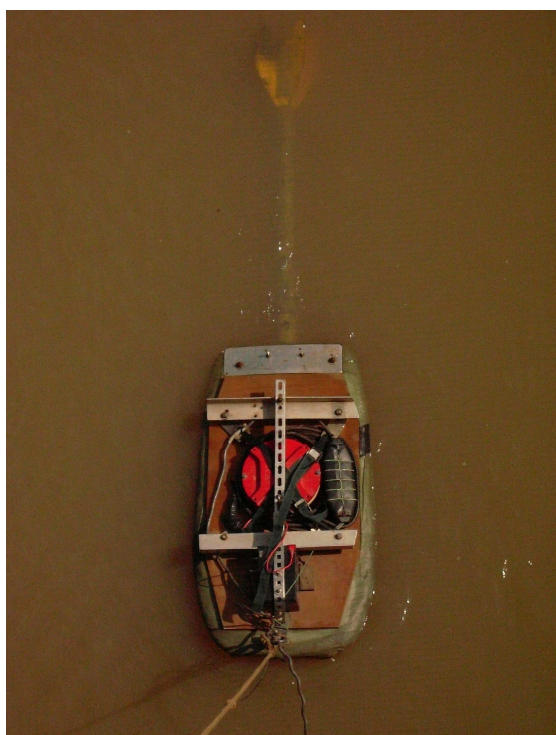


Figure 7 : ADCP - Appareil de mesure du

L'ADCP est équipée sur sa partie supérieure d'une batterie 12 Volts et d'une armature permettant de la fixer à la corde. Les cellules permettant la mesure du débit sont situées sur la partie inférieure. Une queue est attachée à l'arrière pour guider l'ADCP face au courant.

Nous essayons de passer d'une rive à l'autre dans une section la plus perpendiculaire à l'écoulement possible, mais l'ADCP est capable de corriger des trajectoires inclinées, dans la mesure où l'on ne fait pas de boucle.

Il existe également un outil permettant de corriger la position des cellules par rapport à l'horizontale, mais les zones de fort courant sont toujours moins bien renseignées que les eaux calmes.



Figure 8 : Jaugeage depuis un pont

L'ADCP est équipée d'un câble port série et d'une corde suffisamment longs pour permettre de récupérer les données à partir d'un pont, tout en déplaçant l'ADCP d'une rive à l'autre.



Figure 9 : Jaugeage depuis le Zodiac avec le moteur

Lorsque la section étudiée n'est pas à proximité d'un pont, ou encore que les piles de pont perturbent trop l'écoulement pour permettre à l'ADCP de fonctionner correctement, on utilise le Zodiac. L'ADCP est attachée à une planche sur le Zodiac et il s'agit d'aller d'une rive à l'autre le plus linéairement et régulièrement possible. Evidemment, les zones de fort courant rendent cette étape encore plus difficile.



Figure 10 : Jaugeage depuis le Zodiac à l'aide d'un câble

Si le courant n'est pas trop fort et la section pas trop grande, il est possible d'installer un câble en travers de la section et de tirer le Zodiac à la main. On élimine ainsi les aléas du à l'utilisation du moteur et la section est bien perpendiculaire à l'écoulement.

Cette partie du travail de terrain est utilisée par la suite dans le traitement des données limnimétriques. Il me faudra traiter les données brutes de hauteur d'eau des appareils de mesure, des lecteurs et des opérateurs pour ensuite les coupler aux données issues des tournées de jaugeage et ainsi remonter aux valeurs de débit dans les rivières, aux volumes écoulés, annuels ou journaliers. Un travail sur les données de débit en fin de saison permet en retour de remonter aux valeurs de hauteur d'eau durant le tarissement de la rivière.

IV. Traitement des données

Le travail de bureau consiste essentiellement à lire, critiquer et archiver les données récupérées sur le terrain. Je m'occupe surtout pour l'instant du traitement des données de pluie et de flux.

1. Partie pluviométrie

Mon travail pour cette partie consiste à fournir une base de données propre, uniforme et la plus complète possible. C'est cette base de données qui sera utilisée par la suite par les chercheurs. Je dois également rédiger le rapport de campagne 2008.

a. Les logiciels

Les données récoltées (un fichier par tournée et par station) sont dans des formats spécifiques aux appareils de mesure. Il s'agit d'utiliser différents logiciels pour les critiquer, les corriger, les intégrer à différents pas de temps et les archiver dans des formats type Excel ou texte.

La première chose est donc de convertir les données .dtf ou .hobo en un fichier .txt lisible à l'aide d'un logiciel de traitement de texte. Les logiciels utilisés sont respectivement BoxCarePro et HoboWare pour les appareils Hobo de type filaire ou infrarouge (figures 11 et 12). A ce stade, aucune modification n'est apportée sur les données, elles sont toujours sous la forme : « date » « heure » « n° du basculement » (figure 13).

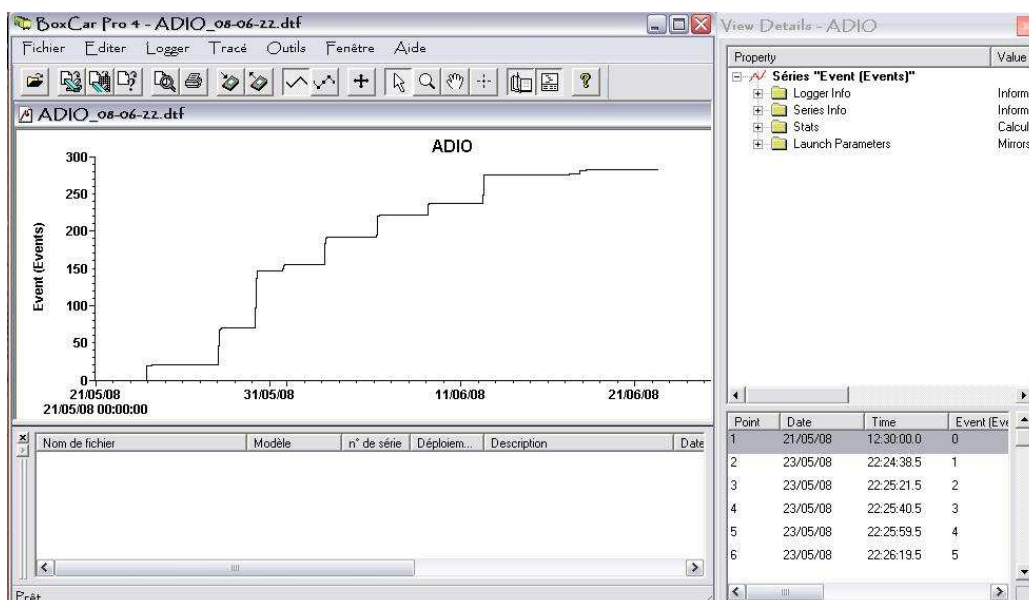


Figure 11 : Interface du logiciel BoxCarePro

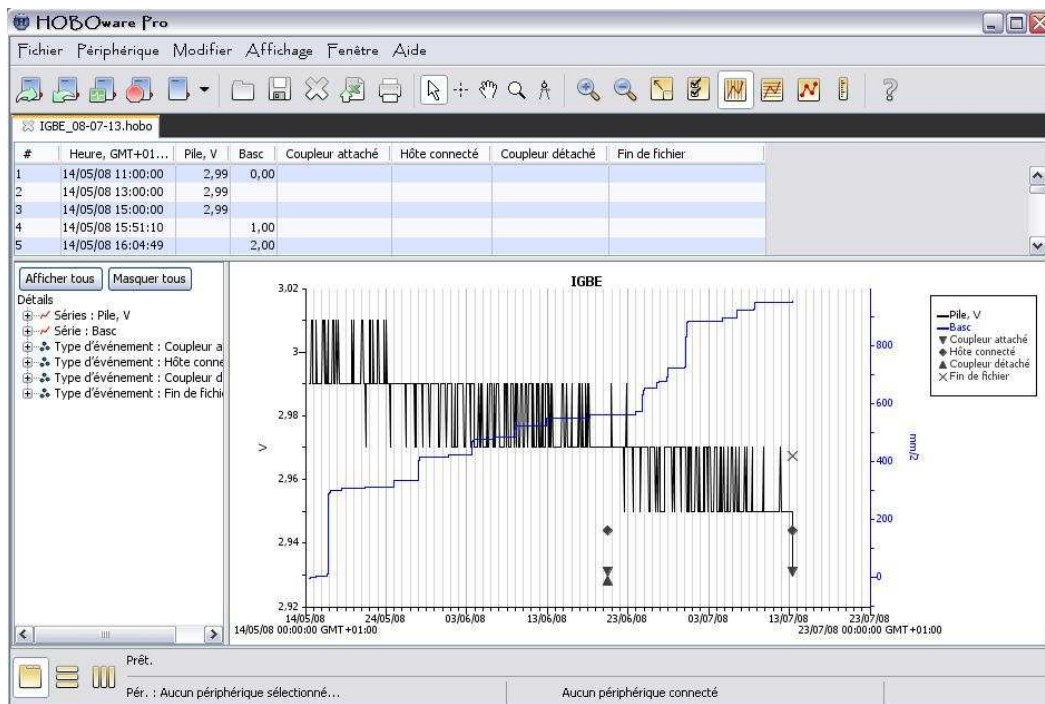


Figure 12 : Interface du logiciel HoboWare

Trois informations permettant le contrôle qualité sont alors ajoutées pour chaque tournée et chaque station au fichier .txt créé : le cumul seau, la calibration des augets et la dérive temporelle, qui résultent tout deux d'un calcul préalable. On fait également apparaître sur ce document les périodes de lacune au niveau des enregistrements de basculement ou du seau. En effet, lorsqu'une pile s'arrête, qu'un élément du pluviomètre ou autre est bouché, il est parfois possible de sauver une partie des données, une syntaxe particulière permet alors de mettre en lacune uniquement la période réduite où les données sont perdues.

```

Date Time Event (Events) #121.51 #0.4939 #0.99997 >> nouveau diagramme
19/01/07 12:50:00 0 >> Date + Heure + Numéro du basculement
23/03/07 20:01:41 1
23/03/07 20:01:56 2
23/03/07 20:02:18 3
23/03/07 20:02:36 4
...
02/05/07 02:55:56 260
02/05/07 03:36:40 261
02/05/07 04:52:35 262
02/05/07 15:00:43 262 >> fin du diagramme
Les diagrammes représentent une période entre deux tournées, il n'y a pas encore de notion d'événement à ce stade.
Date Time Event (Events) #85.5 #0.4939 #0.99997 >> nouveau diagramme
02/05/07 15:25:00 0
07/05/07 06:54:57 1
07/05/07 07:09:13 2

```

Figure 13 : Fichier Hobo au format texte

Ensuite, on utilise des codes qui ont été écrits sous IDL (un langage de programmation propriétaire apparu à la fin des années 1970) afin de sommer et corriger les données. Ces différents codes permettent d'obtenir les pluies dans les fichiers .ORE aux pas de temps de 5 minutes, horaire, journalier et décadaire déterminés comme pertinents par les chercheurs ou encore d'effectuer une analyse événementielle de la pluie (figure 14).

```

# année      pas cumul      type corseau
# 2006      JOU          1          >> ici pas Journalier, correction seuil type 1
# pas delta en secondes      Unité données      valeur lacune
# 86400.      mm          -9999.9
# Code cieH / Nlignes / Date(fin)      Heure UTC(fin)      cumul pas en mm      cumul an en mm
Date deb      Heure loc deb      Date fin      Heure loc fin
1110010660      ///      code cieH (c'est le code de la station pluvio : 1110010660)
29
02/01/2008      06:00:00      -9999.9      -9999.9      01/01/2008      07:00:00      02/01/2008      07:00:00
19/02/2008      06:00:00      -9999.9      -9999.9      18/02/2008      07:00:00      19/02/2008      07:00:00
>> donc lacunes du 01/01/2006 à 7h locale jusqu'au 19/2/2006 au soir
22/03/2008      06:00:00      0.0      0.0      21/03/2008      07:00:00      22/03/2008      07:00:00
23/03/2008      06:00:00      4.5      4.5      22/03/2008      07:00:00      23/03/2008      07:00:00
24/03/2008      06:00:00      8.5      13.0      23/03/2008      07:00:00      24/03/2008      07:00:00
25/03/2008      06:00:00      0.0      13.0      24/03/2008      07:00:00      25/03/2008      07:00:00
...
31/03/2008      06:00:00      0.0      13.0      30/03/2008      07:00:00      31/03/2008      07:00:00
>> 0 (pluie nulle) du 25/03/2006 à 7h loc jusqu'au 31/03/2006 7h
06/07/2008      06:00:00      11.0      479.5      05/07/2008      07:00:00      06/07/2008      07:00:00
07/07/2008      06:00:00      28.0      507.5      06/07/2008      07:00:00      07/07/2008      07:00:00
08/07/2008      06:00:00      18.0      525.5      07/07/2008      07:00:00      08/07/2008      07:00:00

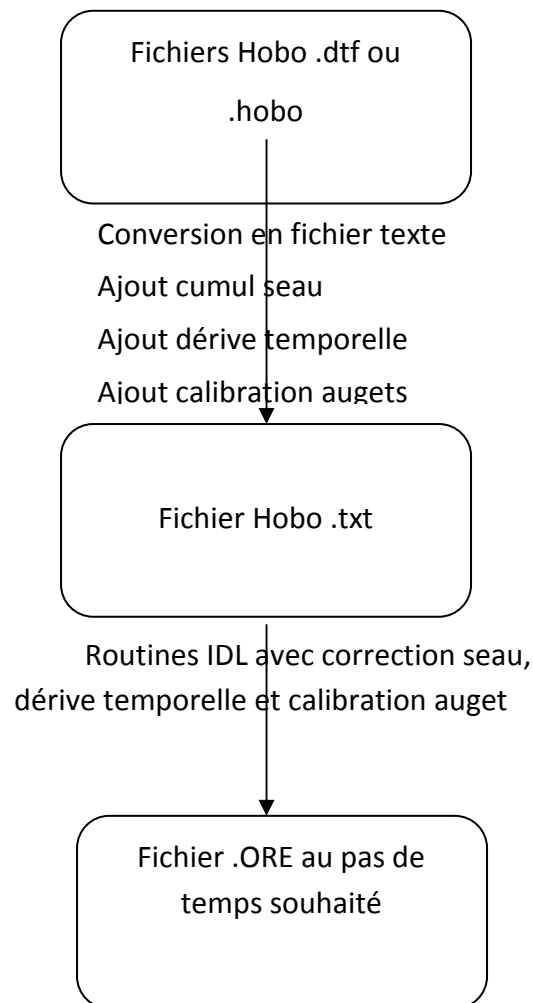
```

Figure 14 : Fichier ORE au pas de temps journalier

Une autre méthodologie de critique consiste à utiliser la cohérence spatiale et la vitesse de déplacement des systèmes convectifs (Depraetere et al., in press), le but étant

d'identifier des événements pluvieux caractéristiques s'établissant dans une direction E-N-E vers W-S-W à une vitesse d'environ 40 km/h, ce sont les systèmes convectifs mobiles et organisés (SCO) qui sont observés en zone sahélienne et ont un impact déterminant dans la dynamique globale de la pluie au Bénin : 88% de la pluie annuelle provient de SCO (Lawin, 2007); et en Afrique de l'Ouest en général.

Les fichiers de pluie issus d'IDL sont des .ore, relativement aux Observatoires de Recherche en Environnement, ce sont des colonnes séparées par des virgules. Ils sont donc lisibles sous Excel. D'autres fichiers, texte ou graphique, peuvent être créés à la compilation sous IDL.



b. Le rapport de campagne

Ce rapport est rédigé annuellement et présente un aperçu rapide de l'état du réseau pluviométrique ainsi qu'une description de la saison des pluies.

Il y a tout d'abord l'évolution du réseau d'une année sur l'autre, sa situation géographique, mais également un bilan sur le taux de fonctionnement des appareils, les problèmes rencontrés ainsi que les solutions trouvées.

La deuxième partie présente des généralités sur l'année observée, la distribution spatiale des pluies et la chronologie des événements sur les différents réseaux.

Les conclusions du rapport de l'année 2008, que j'ai donc rédigé, permettent de mettre en évidence plusieurs points :

- ✓ le bon taux de fonctionnement des appareils du réseau (présence ou non de données) autour de 92 %, une amélioration par rapport à l'année précédente à 88% et un des meilleurs taux depuis la mise en place du réseau (avec 2003 et 2007),
- ✓ le taux de fonctionnement des appareils de mesure infrarouges implantés à partir de 2007 et occupant aujourd'hui 20% du réseau est de 88%, c'est un résultat convenable mais qui demande à être suivi de près dans les années à venir, notamment avec le remplacement des anciens appareils défectueux par ces nouveaux systèmes infrarouges,
- ✓ on ne relève plus aucun problème de dérive temporelle sur les appareils, les HOBO confirment leur robustesse de ce point de vue,
- ✓ la majorité des problèmes conduisant à la perte de données proviennent du mauvais suivi quotidien des appareils, un passage journalier des gardiens, comme il est prévu, permettrait d'éviter plus de 50% de ces problèmes. Les derniers 50% sont plus aléatoires et mettent en cause de nombreux paramètres (humains, techniques, insectes,...),
- ✓ La saison des pluies 2008, après un début peu pluvieux jusqu'au mois d'août, atteint un cumul en fin d'année assez proche des cumuls moyens de la période dite « humide 1950-1969 » (par opposition à la période dite « sèche » de 1970-1990) avec une moyenne de 1217mm contre 1252mm en « humide » et 1109mm en « sèche ».

2. Suivi des flux d'évapotranspiration

La documentation des flux fait partie des observations renforcées (EOP) visant à étudier les processus contribuant au bilan hydrologique. Cette étude est faite afin de mieux comprendre les interactions sol-atmosphère observées au Bénin, ce phénomène étant très important dans un tel climat où le soleil chauffe rapidement la surface après un évènement pluvieux. De plus, les mesures de flux permettent de contribuer à l'évaluation du bilan hydrologique en affinant la connaissance du devenir des eaux de pluie (évaporation, infiltration, ruissellement) à l'échelle intra-saisonnière. Une première instrumentation installée en 2005 et constituée de prototypes a rapidement montrée ses limites dans un environnement tropical humide. L'équipement a entièrement été renouvelé en 2007.

Cette étude des flux est plus récente et également plus expérimentale que la pluviométrie. C'est un domaine étudié depuis moins longtemps et qui connaît peu de personnes de référence. Les chercheurs de AMMA-CATCH ont dus se former assez rapidement à la théorie et à la pratique propres à cette étude, s'adapter au climat et être critique sur les résultats obtenus. Il m'a été offert de prendre part à ces opérations, d'observer les réactions des chercheurs et d'intervenir sur le terrain.

a. Les sites

Les sites choisis pour le suivi des flux d'évapotranspiration sont situés sur le bassin versant de la Donga qui est le super site du programme AMMA au Bénin et bénéficie à ce titre d'un suivi hydro-pluviométrique fin. Sur ce bassin, des toposéquences ont été choisies pour suivre localement le bilan hydrologique complet : pluie, débit, infiltration dans la zone non saturée (0-1m), hauteur de la nappe (perchée et dans les altérites), ainsi que l'évapotranspiration. Les toposéquences sont choisies sur des couverts végétaux contrastés afin de documenter la variabilité des flux due au type de couvert (Galle et al., 2009).

La première toposéquence, située à Nalohou représente une zone cultivée où les arbres sont rares et la végétation annuelle.

La deuxième toposéquence, est une forêt classée située sur la commune de Béléfougou. Il s'agit d'une forêt claire à *isoberlinia*.

Les actions suivantes y sont menées :

- ✓ Documentation des flux d'évapotranspiration et de CO₂,
- ✓ Suivi du bilan hydrologique complet sur des sites pilotes (Nalohou, Béléfougou),
- ✓ Analyse du rôle du couvert et de la pluviométrie sur les flux d'évapotranspiration et de carbone,
- ✓ Comparaison aux simulations des modèles hydrologiques et climatiques.

b. Le principe de la mesure

Les mesures de flux d'évapotranspiration et de chaleur sensible sont faites selon le principe de l'Eddy Correlation. Elle est basée sur le bilan de l'énergie à la surface du sol :

$$Rn = H + G + LE \quad (1)$$

Tous ces termes sont des flux d'énergie (w.m^{-2}) avec :

- ✓ Rn : rayonnement net,
- ✓ H : flux de chaleur sensible,
- ✓ G : flux de chaleur dans le sol,
- ✓ LE : flux de chaleur latente.

Suivant les gradients de température et d'humidité dans le sol et dans l'air à un instant donné, et en fonction de la vitesse du vent et de la turbulence de l'air, le rayonnement net va se répartir de façon différente entre les trois termes de droite de l'équation (1). Nous allons maintenant détailler chacun de ces termes et sa mesure.

Le rayonnement net

Le rayonnement net est la résultante des flux d'énergie incidente et réfléchi en grande et courte longueur d'onde :

$$Rn = (SWin-SWout) + (LWin-LWout) \quad (2)$$

Avec :

- ✓ SWin : rayonnement incident courte longueur d'onde (rayonnement solaire direct),
- ✓ SWout : rayonnement solaire réfléchi courte longueur d'onde,
- ✓ LWin : rayonnement incident grande longueur d'onde (nuages et atmosphère),
- ✓ LWout : rayonnement réfléchi et émis par la terre en grande longueur d'onde.

Le rayonnement net peut être mesuré soit directement par un appareil qui fait la différence entre l'incident et le réfléchi toutes longueurs d'ondes confondues (NR-Lite), soit par un ensemble de 4 capteurs qui mesurent les 4 termes du bilan (CNR1).

Le flux de chaleur dans le sol

Le flux de chaleur dans le sol G peut être mesuré soit par des plaques à flux (Hukseflux) qui doivent être placées très proches de la surface du sol, soit modélisé à partir de mesures du gradient de température et d'humidité du sol. Plusieurs modélisations peuvent être employées : méthode du bilan ou méthode des harmoniques. Nous disposons sur nos sites de plaque à flux et de mesures de températures et d'humidités du sol qui nous permettent de comparer toutes les méthodes. Un grand soin doit être accordé à l'estimation de ce terme au Bénin, car il atteint des valeurs élevées, proches de celles du flux de chaleur sensible. La méthode des harmoniques s'est montrée la plus performante (Cohard et al., 2007).

Le flux de chaleur sensible

C'est le flux de chaleur qui se dissipe dans l'atmosphère. Il est d'autant plus fort que le sol est sec, le rayonnement net important et l'air instable (turbulent). Il se mesure avec un anémomètre sonique. Cet anémomètre mesure la vitesse du vent en 3D et la température associée à très haute fréquence (20 Hz). Ces mesures permettent d'estimer la turbulence de l'air qui est liée au flux de chaleur sensible. On fait ensuite une moyenne de la vitesse du vent dans le plan vertical (w) et de la température (T) toute les demi-heures et on obtient leur fluctuation instantanée :

$$w' = w - \text{moyenne}(w) \quad (3)$$

$$T' = T - \text{moyenne}(T) \quad (4)$$

La covariance de ces fluctuations est directement reliée au flux de chaleur latente :

$$H = \rho_a C_p \text{cov}(w'T') \quad (5)$$

Où ρ_a est la masse volumique de l'air (kg.m^{-3}) et C_p sa chaleur massique ($\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$). Ces deux grandeurs caractéristiques de l'air sont fonction de sa température et de sa pression.

Pour résumer, la mesure du flux de chaleur sensible nécessite la mesure de la vitesse et de la température à haute fréquence (20 hz) faite par un anémomètre sonique (CSAT), combiné à des mesures basse fréquence (demi-heure) de la pression et de la température de l'air. Cependant, en première approximation on peut utiliser $\rho_a C_p = 1120 \text{ J.K}^{-1}$, ce qui permet d'estimer les flux rapidement, sans avoir à synchroniser les fichiers.

Le flux de chaleur latente

Le flux de chaleur latente (LE) est l'énergie utilisée pour faire passer les molécules d'eau de l'état liquide à l'état gazeux. Il est directement relié au flux d'évapotranspiration (E). Ce flux d'évapotranspiration est égal à la somme de l'évaporation du sol et de la transpiration des plantes. Il faut souligner que les techniques utilisées ici ne permettent pas de distinguer ces deux composantes puisqu'on considère l'eau de l'atmosphère de façon globale.

$$LE = L * E \quad (6)$$

Avec :

- ✓ LE : le flux de chaleur latente (w.m^{-2}),
- ✓ L : la chaleur latente de changement d'état ($2.46 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$),
- ✓ E : l'évapotranspiration (mm.s^{-1}).

Si on ne dispose pas d'appareil spécifique on peut déduire le flux de chaleur latente du bilan d'énergie (7). L'incertitude sur l'estimation de LE est alors la somme de celle sur tous les autres termes du bilan.

$$LE = Rn - G - H \quad (7)$$

Le contenu en eau de l'air atténue sa transmissivité dans certaines longueurs d'onde. C'est sur ce principe qu'est basé l'analyseur de gaz haute fréquence (LICOR) qui mesure la densité en eau mais aussi en dioxyde de carbone. Si on combine la fluctuation à haute fréquence de la vapeur d'eau (H_2O') ou du gaz carbonique (CO_2') à celle de la vitesse verticale du vent (w'), on peut estimer le flux de chaleur latente (8) ou de carbone (9).

$$LE = cov(H_2O' w') \quad (8)$$

$$F_{CO_2} = cov(CO_2' w') \quad (9)$$

NB : La mesure du flux de chaleur latente nécessite un analyseur de gaz et un anémomètre sonique.

c. L'instrumentation

La totalité des équipements nécessaires aux mesures des données décrites ci-dessus sont réunies sur un site (figure 15). On retrouve une instrumentation semblable dans la forêt de Béléfoungou. A noter toutefois que, afin d'intégrer l'évapotranspiration du couvert végétal, ces équipements on du être fixés sur un pylône haut de 17 mètres.

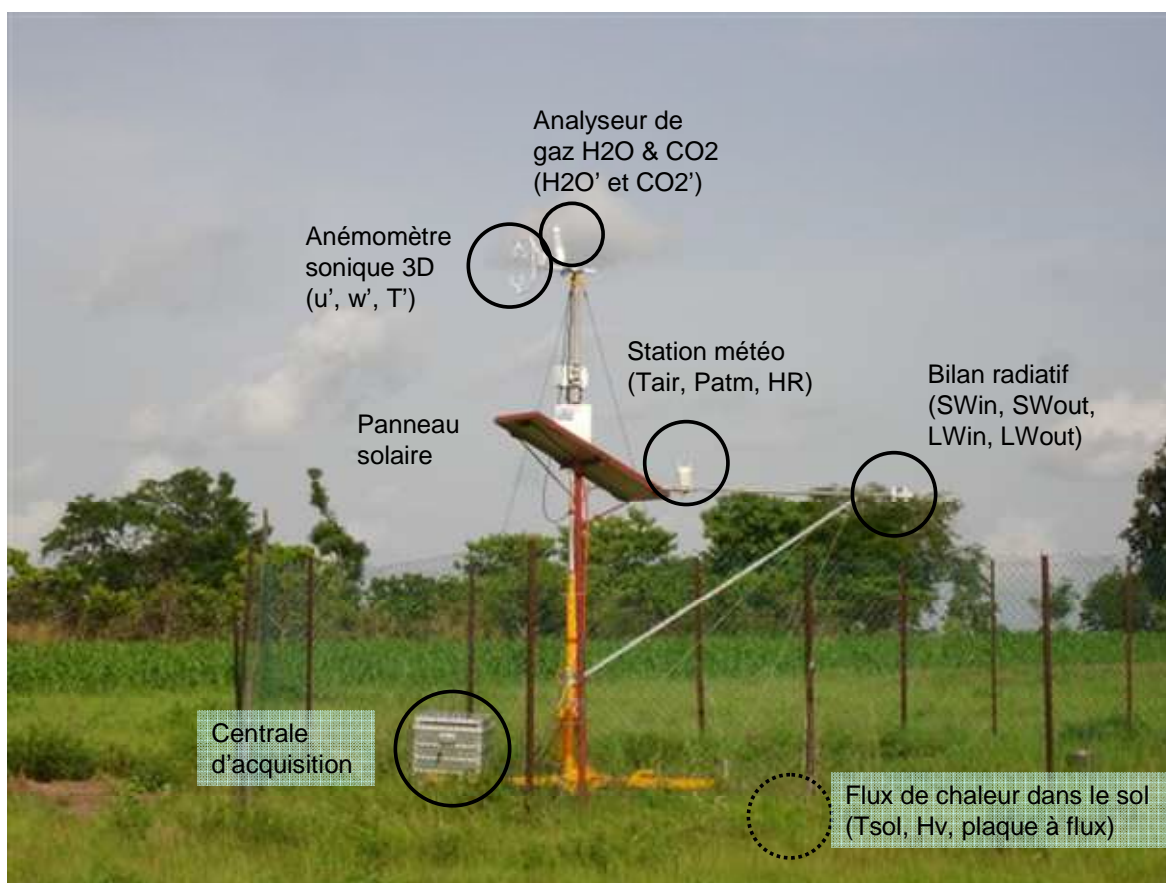


Figure 15 : Instrumentation du site de mesure de flux de Nalohou

d. Traitement des données de terrain

Les données de terrain sont prises à la haute fréquence de 20hz pour les données sonique (vitesse et direction du vent, température sonique) et de l'analyseur de gaz (vapeur d'eau et CO₂), et au quart d'heure pour les données météorologiques (Tair, humidité relative, pression atmosphérique,...)).

Si les données météorologiques peuvent être traitées avec de simples fichiers Excel, les données haute fréquence et l'analyse de leurs fluctuations nécessitent un logiciel dédié. Le logiciel EdiRe (figure 16) a été choisi. Développé par l'Université d'Edinburgh (GB), il est dédié au traitement des mesures d'Eddy Correlation, et téléchargeable gratuitement. C'est

une boîte à outil qui permet d'appliquer les différents traitements nécessaires aux données de flux suivant les caractéristiques techniques de l'appareil (calibration, angle d'attaque, temps de réponse) et du climat (densité, stabilité de l'air) pour obtenir les flux de chaleur latente et/ou sensible au pas de temps de la demi-heure. Chaque type de traitement est défini par une liste de commande (proclit).

La volonté est de créer une liste de commandes commune pour l'ensemble des sites AMMA (Mali, Niger Bénin) afin d'homogénéiser le traitement des données et leur analyse, pour une meilleure comparaison intersites.

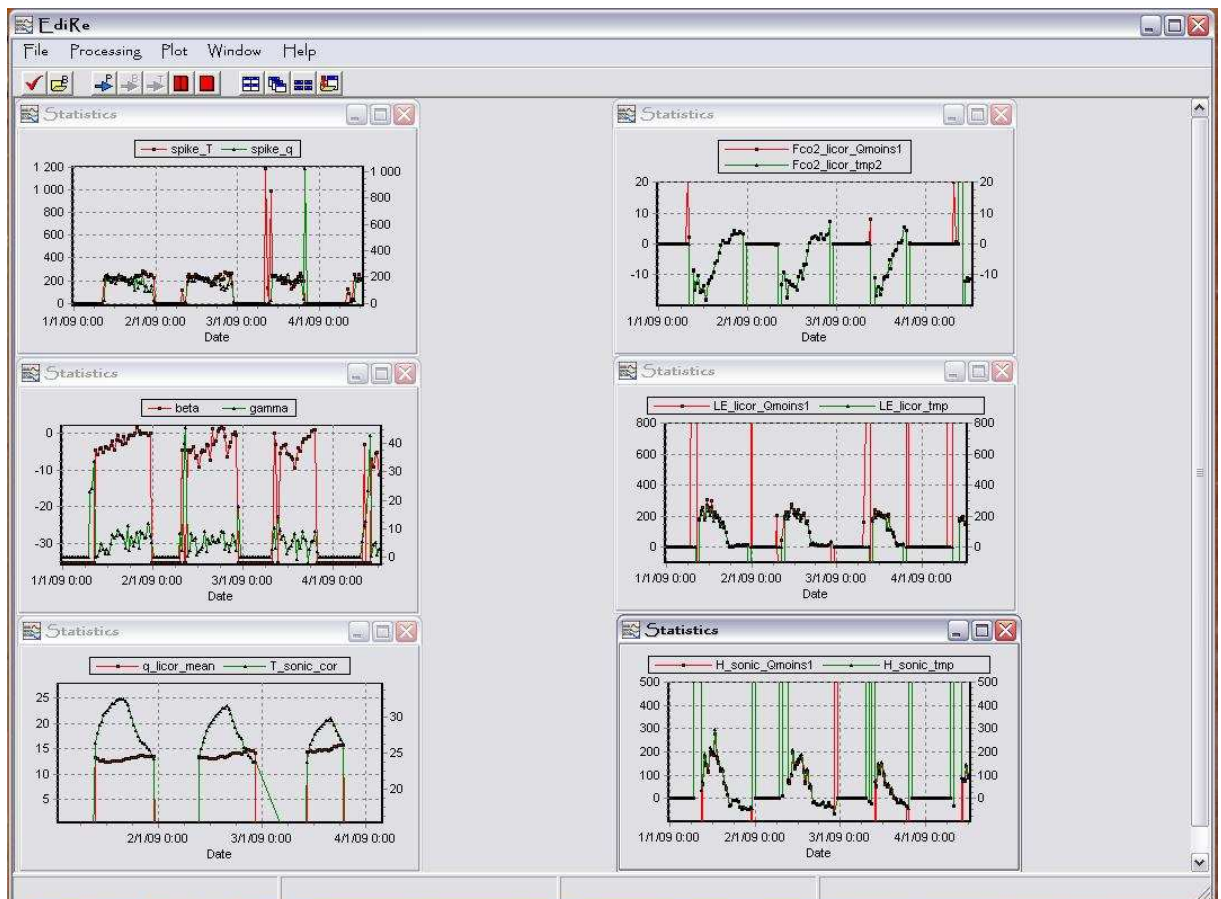


Figure 15 : Interface du logiciel Edire

Mon travail consiste principalement à archiver, contrôler et pré-analyser les données de flux récupérées par un technicien sur le terrain toutes les 3 semaines. Les données sont traitées pour être disponibles au pas de temps journalier. Les données météo sont traitées en parallèles, notamment pour être lisibles par le logiciel Edire qui exige une syntaxe particulière (enregistrement des données au milieu du pas de temps considéré).

Lors de l'archivage, il s'agit de vérifier la bonne continuité des données d'une tournée à l'autre et le cas échéant de notifier les périodes de lacune et d'estimer leur origine afin d'éviter de tels problèmes par le futur.

Le contrôle des données est effectué à partir d'une liste de commande assez rudimentaire qui permet d'évaluer rapidement leur qualité : panne d'un appareil, problème survenant à une heure particulière de la journée, données incohérentes. Elle à été créée afin que le technicien qui relève les données une fois toutes les 3 semaines puisse réagir immédiatement sans attendre la prochaine tournée avant de corriger les problèmes, auquel cas 3 semaines de données sont à nouveau perdues ou erronées. Une seconde liste de commande est créée afin d'effectuer des analyses plus rigoureuses, plus fines, qui intègrent les données météo du site ainsi que les corrections des appareils ou autre pour remonter aux vrais valeurs de flux.

Dans l'exemple suivant, on peut constater que les valeurs de flux de CO₂ tombent à 0 la nuit. Ceci étant le cas pour toutes les autres valeurs, on en déduit que les batteries qui alimentent les appareils pendant la nuit ne sont pas assez rechargées par les panneaux solaires pendant la journée. Il faut donc vérifier la bonne connexion des batteries aux panneaux solaires, leur bon état, et le cas échéant, ajouter un système panneau solaire+batterie pour renforcer l'autonomie des appareils la nuit.

On vérifie par contre que l'évolution des grandeurs est cohérente avec l'évolution de l'exposition solaire pendant la journée. Ici (figure 17) un flux de CO₂ négatif pendant la journée qui s'accorde avec le fonctionnement de la végétation. On remarque qu'au début de la nuit, le flux de CO₂ s'inverse et devient positif. Une fois les batteries épuisées, les enregistrements s'arrêtent.

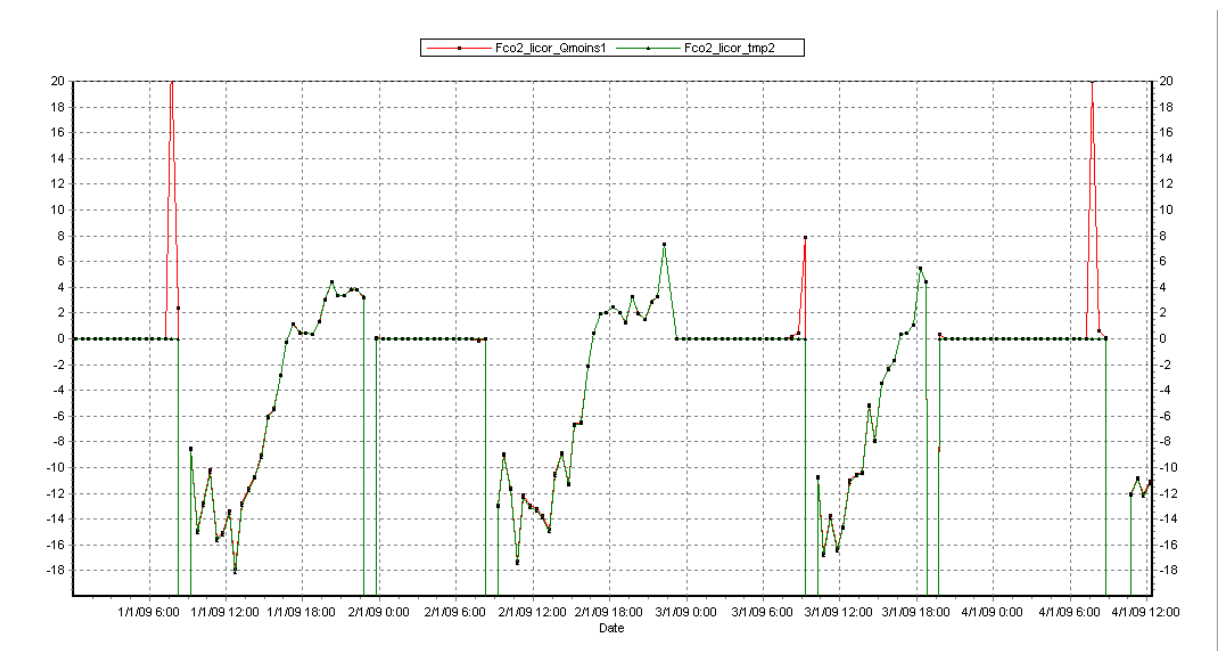


Figure 16 : Exemple de panne détectée, épuisement des batteries la nuit

La quantité de données à traiter est source de nombreuses erreurs et imperfections. On a tout d'abord de nombreux problèmes de pics, qui peuvent survenir de l'environnement naturel ou encore des appareils. Il s'agit pour nous d'essayer d'éliminer les pics parasites qui empêchent une lecture des données tout en conservant les phénomènes naturels qui peuvent en être l'origine. Il serait également bon de classer les données traitées selon certains critères de qualité. On peut trouver de tels critères dans la documentation scientifique, une sélection à été faite dans notre cas. Cette étude est en cours d'élaboration et à pour but de classer les résultats selon trois catégories : données utilisables pour la recherche, données utilisables pour des observations de longue période (notre cas ici), ou encore données inutilisables tel quel.

Conclusion

Ces premiers mois m'ont donné une vue d'ensemble du contenu de mon année de césure. Du temps a été pris au début pour me former aux différents logiciels et codes informatiques utilisés pour le traitement des données. J'ai également pu aller rapidement sur le terrain afin de faire le parallèle entre les données que je dois traiter et leur mode d'acquisition, les problèmes pouvant être rencontrés. De plus, j'ai eu l'occasion d'effectuer une mission en France qui m'a permis de mieux comprendre l'acquisition et le traitement des données de flux, avec une étude théorique plus fine que pour la partie hydrologie. C'était également l'occasion de rencontrer les différents acteurs du programme AMMA au Niger et au Mali, afin de s'accorder sur les protocoles utilisés sur le terrain et au bureau.

J'ai constaté que beaucoup de temps et d'efforts sont accordés à l'homogénéisation des données et de leur traitement, tant au niveau interannuel que spatial. Ceci est dû à la fréquence de modification des appareils de terrain, au changement de personnel, et à la difficulté de communication entre des sites éloignés, au Bénin, au Niger et au Mali, tous trois pilotés depuis la France.

Jusqu'à maintenant, j'ai une approche beaucoup plus pratique que théorique des phénomènes étudiés. Les nombreuses tournées de terrain me permettent d'estimer la valeur d'une bonne base de données, de mesurer la difficulté de conserver un réseau d'appareils uniforme et en bon état. En effet, malgré des tournées prévues tout les mois, on rencontre toujours des problèmes matériels, informatiques ou encore humains à régler. Un autre aspect très enrichissant des tournées de terrain est la rencontre des populations rurales. Les appareils étant situés dans des endroits reculés, nous sommes au contact d'une population radicalement différente de celle de la grande ville de Cotonou, vivant autrement plus simplement, même si la barrière de la langue limite parfois les échanges dans les campagnes.

Mon travail est donc orienté vers une approche moins théorique que pratique des phénomènes étudiés, notamment du à l'absence totale de chercheurs au Bénin à partir de l'été 2008. Mais il est très enrichissant sur le plan pratique de par le temps passé sur le terrain, et humain grâce à la très bonne ambiance qui règne au sein de l'équipe de travail, ainsi qu'aux bonnes relations entretenues avec les tuteurs en France.

Ce fut également pour moi une première approche du monde de la recherche à travers un programme de développement à l'étranger qui me fait me poser à deux fois la question de la thèse pour le futur...

REPRESENTANT

Bruno BORDAGE

Annexe 1 : "Organigramme IRD Bénin début 2009"

EQUIPES SCIENTIFIQUES					EQUIPE D'APPUI A LA RECHERCHE
Maladie à Vecteurs		Variabilité climatique		Autres activités	
UR010 <u>6 expatriés</u>	UR016 <u>4 expatriés</u>	UMR 065 <u>3 expatriés</u>	UMR 012 + UMR 050 <u>2 expatriés</u>	Biodiversité Aires-Sud	REGISSEUR (expatrié) Laurence QUILICHINI
<u>3 chercheurs :</u> Nadine FIEVET David COURTIN Nicaise TUIKUE N'DAM <u>1 ingénieur :</u> Gilles COTTRELL <u>1 VI :</u> Sophie BORGELLA <u>1 interne :</u> Antoine RACHAS + <u>2 doct. DSF :</u> A. LOKOSSOU S. OUEDRAOGO <u>6 autres doct. :</u> C. BAXERRES C. DEHAVANNE Lise DENOEUDE BT HUYNH A. LEPORAT C. PIERRAT <u>7 CDD :</u> C. AHOUANGINOU M. AYAVI A. BOURAIMA E. GODONOU S. GUEHOU P. KOUNOU S. VIGNIGBE	<u>3 chercheurs :</u> V. CORBEL T. BALDET F. REMOUE <u>1 VI :</u> N. MOIROUX + <u>1 ch assoc jeai :</u> L. DJOGBENOU <u>1 doct DSF :</u> A. DJENONTIN <u>3 autr doct :</u> T. HOUNDETE I. DJEGBE AS Bio Bangana <u>1 CDI :</u> J. CHABI <u>4 CDD :</u> C. AGOLI-AGBO D. BOUKARI E. GUEDUY F. ZOUMENOU	<u>1 chercheur :</u> B. BOURLES <u>1 Ingénieur :</u> R. CHUCHLA <u>1 VI :</u> V. RACAPE	<u>1 ingénieur</u> F. LITTEL <u>1 VI :</u> A. PERIAULT + <u>1 doct DSF :</u> A. ZANNOU <u>1 autre doctorant :</u> E. ALAMOU <u>2 CDI :</u> S. AFOUDA T. OUANI-YOSSIDE <u>7 CDD :</u> M. WUBDA I. IMOROU J. SOGBA-GOH E. PAGOU M. AGOUA A. DOSSOU-YOVO C. DARAKPA	<u>1 doctorant :</u> K. KOURA Riz UMR 121 <u>1 doctorant :</u> G. DJEDATIN Nutrition UMR 204 <u>1 doctorant :</u> W. AMOUSSA	COMPTABILITE <u>2 CDI :</u> Gaëtan SESSINO Chancel KONATE SECRETARIAT <u>1 CDI</u> Bellinda AHONON COMMUNICATION <u>1 VI :</u> Cristelle DUOS <u>1 CDI :</u> Rita SAUDEGBEE CHAUFFEUR <u>1 CDI :</u> Gérard KPOHOUENON

Bibliographie

- Andersen, I., Dione, O., Jarosewich-Holder, M., Olivry, J.C., 2005. *The Niger River Basin: a vision for sustainable management..* The World Bank, Washington, DC, the USA; Directions in development, K.G. Golitzen Ed.145 p.
- Cappelaere, B., Descroix, L., Lebel, T., et I, 2009. The AMMA Catch observing system in the cultivated Sahelian of South West Niger- Strategy, Implementation and Site conditions. Journal of Hydrology in press.
- Cohard J.-M., Guyot A., Kergoat L., Timouk F., Cappelaere B., Galle S., Ramier D., Suarez L. and group A. L. s. w., 2007. Could soil heat storage play a role in monsoon processes ? In: J.-L. Redelsberger (Editor), "2nd AMMA Int. Conf." AMMA, Karlsruhe (Germany). Communication
- Depraetere. C, M Gosset, S Ploix, H Laurent, 2009. The organization and kinematics of tropical rainfall systems ground tracked at mesoscale with gages : First results from the campaigns 1999-2006 on the Upper Ouémé Valley (Benin). Journal of Hydrology (AMMA-CATCH special issue), in press.
- Descroix, L., Mahé, G., Favreau, G., Gautier, E., Olivry, J-C., Albergel, J., Diedhiou, A., Lebel, T., Galle, S., Dessouassi, R., Sighomnou, D., Cappelaere, B., Le Breton, E., Mamadou, I. Spatio-Temporal Variability of Hydrological Regimes Around the Boundaries between Sahelian and Sudanian Areas of West Africa : A Synthesis. Journal of Hydrology, AMMA special issue, in press.
- Galle S., Le Lay, M., C. Peugeot and L. Séguis (2004). Impact de la distribution des pluies sur les ressources en eaux superficielles du Haut Bassin de l'Ouémé (Bénin). Conf. Int. sur la gestion intégrée des ressources hydriques des bassins versants tropicaux (IMPETUS), Cotonou, Bénin.
- Galle S., Séguis L., Mamadou O., Peugeot C., Zin I., Gosset M. and Seghieri J., 2009. Water redistribution along hillslope in Benin. Influence of the vegetation cover. "AMMA 3rd Int. Conf.", Ouagadougou (Burkina-Faso), 20-24 July 2009.
- Hewlett J. and A. Hibbert, 1967, Factors affecting the response of small watersheds to precipitation uin humid areas, In International Symposium on Forest Hydrology, Pergamon, New-York, pp 275-290
- Horton R., 1933, The role of infiltration in the hydrological cycle, Trans. American Geophysical Union, 14, pp 446-460 1.1.1
- Lawin E., 2007. Analyse climatologique et statistique du régime pluviométrique de la haute vallée de l'Ouémé à partir des données pluviographiques AMMA-CATCH Bénin
- Lawin E., 2007. Analyse climatologique et statistique du régime pluviométrique de la Haute Vallée de l'Ouémé à partir des données pluviographiques AMMA-CATCH Bénin. Thèse

- de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG) et de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC). Dir M. Gosset
- Le Barbe, L, Lebel, T, Tapsoba, D, 2002. Rainfall variability in West Africa during the years 1950-90. JOURNAL OF CLIMATE 15 (2): 187-202.
- Le Lay M., 2006. Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin. Thèse de Doctorat ED TUE, INPG Grenoble. Dir. Braud I. et Galle S., 251 pp.
- Le Lay M., 2006. Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin. Thèse de Doctorat ED TUE, INPG Grenoble. Dir. Braud I. et Galle S., 251 pp.
- Le Lay M., Bouchez J. M., Boubkraoui S., Gohoungossou A. et Galle S., 2004. Stations limnimétriques de la Haute Vallée de l'Ouémé. Description et courbes de tarage. Rapport ORE AMMA-CATCH, IRD- Direction de l'Hydraulique du Bénin, Grenoble, pp. 83.
- Le Lay, M. & S. Galle, 2005. Variabilités interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien. Seasonal cycle and interannual variability of rainfall at hydrological scales. The West African monsoon in a Sudanese climate. Journal des Sciences Hydrologiques 50 (3) : 509-524.
- Lebel T. and Ali A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990 - 2007). Journal of Hydrology (AMMA-CATCH special issue). In press
- Leblanc, M., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S., Loireau, M., Cappelaere, B., 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. Global and Planetary Change 61 (1-2), 49-62.
- Leduc, C., Favreau, G., Shroeter, P., 2001. Long term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger. Journal of Hydrology 243, 43-54.
- Mahé G., Paturel J.E., Servat E., Conway D., Dezetter A., 2005. Impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling of the Nakambe River in Burkina-Faso. Journal of Hydrology 300, 33-43.
- Périault A., Mamadou O., Galle S., Cohard J.-M. and Kounouhéwa B., 2009. Eddy correlation data from AMMA/catch Benin sites : daily and seasonal analysis of quality controlled data. "AMMA 3rd Int. Conf.", Ouagadougou (Burkina-Faso), 20-24 July 2009: (présentation de poster).
- Séguis, L., Cappelaere, B., Milési, G., Peugeot, C., Massuel, S., Favreau, G., 2004. Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. Hydrological Processes 18, 3401-3413.