



Contribution à l'étude de l'impact du déboisement sur l'évapotranspiration en climat soudanien (Bénin)

Rapport de stage de master 2 Atmosphère, climat et surfaces
continentales



Réalisé par Alban DEPEYRE

Sous la direction de Dr Sylvie GALLE ; chargée de recherche, IGE-
IRD.

Année Académique : 2016-2017



Master Sciences de la Terre et de l'Environnement

Attestation de non plagiat

Je soussigné(e) Alban Depeyre

Auteur du mémoire « Impact du déboisement sur l'évapotranspiration en climat soudanien (Bénin) »

Déclare sur l'honneur que ce mémoire est le fruit d'un travail personnel et que je n'ai ni contrefait, ni falsifié, ni copié tout ou partie de l'œuvre d'autrui afin de la faire passer pour la mienne.

Toutes les sources d'information utilisées et les citations d'auteur ont été mentionnées conformément aux usages en vigueur.

Je suis conscient(e) que le fait de ne pas citer une source ou de ne pas la citer clairement et complètement est constitutif de plagiat, et que le plagiat est considéré comme une faute grave au sein de l'Université, pouvant être sévèrement sanctionnée par la loi.

Fait à Grenoble

Le 11/06/2017

Signature de l'étudiant(e)

Depeyre Alban

Résumé

Dans le cadre du changement climatique, l'Afrique de l'Ouest et notamment le Bénin a connu une intensification du cycle hydrologique. Ce changement combiné avec la dynamique de déboisement au profit de terres cultivées rendent les modèles incapables de converger sur l'évolution future du cycle hydrologique en zone soudanienne. Pour répondre à cette problématique, l'observatoire AMMA-CATCH a mis en place un réseau de mesures. Ces mesures ont mis en évidence une différence d'évapotranspiration de 20% entre un site cultivé et une forêt claire pour les années 2008 à 2010. La présente étude se base sur cette observation avec pour objectif de comparer l'évapotranspiration sur une période plus longue (2007 à 2015) de sorte à prendre en compte des années à pluviométries contrastées. Pour cela nous avons choisi d'utiliser le modèle de la FAO-56 (Food and Agricultural Organisation). L'utilisation de ce modèle requiert un certain nombre de variables météorologiques. Nous souhaitons estimer l'évapotranspiration en continu à un pas de temps fin (ici la demi-heure). Pour cela il faut d'abord combler les lacunes (gap filling) observées dans les données météorologiques. Plusieurs méthodes de gap filling ont été testées, et leurs performances pour différentes longueurs de lacune, évaluées. Finalement deux protocoles de gapfilling pour des lacunes de durée supérieure et inférieure à 1h30 ont été proposés et appliqués à toutes les variables. Les simulations de l'évapotranspiration avec la méthode FAO-56 viennent confirmer les observations précédentes et démontrent que les zones de forêts évapotranspirent en moyenne 15% plus que les zones cultivées. Cette étude met aussi en évidence l'importance du type de couvert végétal dans la sensibilité de l'évapotranspiration à certains paramètres. L'évapotranspiration en zone boisée étant plus sensible à la demande en vapeur d'eau de l'atmosphère tandis que l'évapotranspiration des zones cultivées est contrôlée principalement par les variations du stock d'eau dans le sol (0 à 1 m).

Mots clefs : évapotranspiration, gap filling, couvert végétal, Bénin, FAO-56 modèle

Abstract

In the context of climate change, West Africa and especially Benin experienced an intensification of the hydrological cycle. This change, combined with the deforestation dynamic in favor of cultivated land, leaves the models unable to converge on the hydrological cycle future evolution in the Sudanian zone. To address this problem, the AMMA-CATCH observatory has set up a measurement network. These measures showed a 20% difference in evapotranspiration between a cultivated site and a woodland during the 2008 to 2010 period. The present study is based on this result, our aim is to compare evapotranspiration over a nine year long period (2007 to 2015) in order to take into account years with contrasting rainfall amount. We thus choose to use the FAO-56 model (Food and Agricultural Organization). The use of this model requires meteorological variables. We wish to estimate continuous evapotranspiration at a fine time step (here half an hour). To do so, it is necessary to fill in the gaps observed in the meteorological data. Several gap filling methods have been tested and their performance for different gap lengths evaluated. Finally, two gapfilling protocols have been proposed for gaps of less and more than 1h30. They were applied to all meteorological variables. The FAO-56 evapotranspiration simulations confirm the previous observations and show that the forests evapotranspirate 15% more than the cultivated areas on average. This study also highlights the importance of the vegetation cover type in the sensitivity of evapotranspiration to some parameters. Evapotranspiration in wooded areas is more sensitive to the atmospheric water vapor demand, whereas in the cultivated areas evapotranspiration is mainly controlled by changes in the soil water content (0 to 1 m).

Keywords : Evapotranspiration, gap filling, vegetation cover, Benin, FAO-56 model

2 Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériel et méthode.....	3
2.1	Sites d'études.....	3
2.1.1	Cadre général	3
2.1.2	Bassin versant de la Donga.....	4
2.1.3	Mesure des variables climatologiques.....	6
2.1.4	Mesure du stock d'eau	7
2.1.5	Estimation de l'indice foliaire	7
2.1.6	Mesure de l'évapotranspiration	7
2.2	Modèle de la FAO-56, équation de Penman-Monteith.....	8
2.2.1	Calcul de l'évapotranspiration de référence.....	8
2.2.2	Coefficients cultureux.....	9
2.3	Modèle à base physique ParFlow.....	10
2.4	Méthode de gap filling	10
2.5	Choix des critères de performance.....	11
2.5.1	Erreur quadratique moyenne.....	11
2.5.2	Critère de Nash-Sutcliffe efficiency.....	12
2.5.3	Coefficient de détermination.....	12
2.5.4	Kling-Gupta efficiency (KGE).....	12
2.6	Choix des méthodes de gap filling.....	13
3	Résultats et discussions.....	15
3.1	Gap filling	15
3.1.1	Nombre de jours considéré pour la moyenne climatologique.....	15
3.1.2	Exemple de variable gap fillées.....	16
3.2	Variations interannuelle des précipitations	17
3.3	Evaluation du modèle de la FAO.....	18
3.3.1	Paramètres du sol	18
3.3.2	Sensibilité du modèle au LAI	19

3.3.3	Estimation de la qualité du modèle proposé par la FAO	19
3.3.4	Estimation de la qualité du modèle proposé par la FAO par rapport à un modèle de référence	21
3.3.5	Conclusion	22
3.4	Comparaison de l'évapotranspiration entre Nalohou et Béléfoungou	22
3.5	Variabilité interannuelle de l'évapotranspiration.....	23
3.5.1	Sensibilité de l'évapotranspiration au cumul de précipitations annuelles	23
3.5.2	Indice d'intensité hydroclimatique.....	24
3.5.3	Anomalie de stock d'eau dans le sol	25
4	Conclusion et perspective	26
5	Bibliographie	28

1 Introduction

Le climat est aujourd'hui en train d'évoluer avec une tendance globale au réchauffement des températures **[Rapport du GIEC, 2013]**. Ce changement entraîne en moyenne une intensification du cycle hydrologique **[Huntington, 2006]** ce qui signifie que les régions et périodes de l'année plus humides vont avoir tendance à recevoir plus de précipitations. Cette intensification du cycle hydrologique a été récemment mise en évidence en Afrique de l'Ouest **[Panthou et al., 2014]**. Cependant les modèles climatiques ne convergent pas dans la prédiction de l'évolution des précipitations pour une partie importante de la bande soudanienne ce qui met en évidence une compréhension incomplète du fonctionnement du cycle hydrologique dans cette région. Le Bénin a été sujet à des événements de sécheresse de longue durée (années 1970 à 1990), depuis 1990 on observe une reprise de la pluviométrie annuelle mais l'intensité des événements pluvieux et la fréquence des épisodes secs ne sont plus les mêmes. Il est probable que dans le cadre du changement climatique actuel, ces épisodes de sécheresse augmentent en fréquence **[Lebel et al., 2003]**. Le Bénin est aujourd'hui dépendant de l'agriculture pluviale ce qui rend les populations très vulnérables à ce type d'évènement. La gestion de la ressource en eau passe par la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants. Cette problématique, combinée à la vulnérabilité des populations en zone sub-saharienne face aux épisodes de sécheresse et d'inondation, ont motivé la mise en place de mesures par l'observatoire hydrométéorologique AMMA-CATCH (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine – Couplage de l'Atmosphère Tropical et du Cycle Hydrologique) **[Lebel et al., 2009]**. L'observatoire AMMA-CATCH a installé à partir de 1990 des stations de mesure réparties au Bénin, Niger et Mali de sorte à observer le gradient climatique Nord-Sud caractéristique de cette région **[Redelsperger et Lebel., 2009]**.

Pour soutenir une croissance démographique parmi les plus fortes au monde (plus de 3% par an), le Bénin transforme progressivement l'usage des sols **[Heldmann et al., 2009]**. En Afrique de l'Ouest, la tendance actuelle est une déforestation au profit d'une augmentation des surfaces agricoles **[CSAO, 2012]**. Entre 1975 et 2000, les surfaces cultivées ont augmentées de 57% aux dépens des forêts qui couvraient 33% de la région en 1975 **[Eva, 2006]**. Cette tendance a été estimée au Bénin sur la commune de Djougou par **[Leroux, 2012]** qui observe une diminution de 24% des zones forestières entre les années 1986 et 2000. Ces modifications ont des impacts sur le cycle de l'eau et donc sur les populations, c'est pourquoi il est primordial de quantifier la portée de ces changements. Parmi les différents termes du bilan hydrologique, l'évapotranspiration (ETr) est l'un des moins bien connus. Ce terme correspond à la quantité d'eau renvoyée vers l'atmosphère par les processus d'évaporation du sol et de transpiration des plantes. En zone aride et tropicale, c'est l'un des termes majeur du cycle hydrologique **[Peugeot et al., 2011 ; Mamadou et al., 2014]**, il représente en moyenne 64% des pluies sur les continents.

L'impact de l'utilisation des sols sur l'évapotranspiration a rapidement suscité des intérêts avec la mise en évidence par **[Kabbat et al., 1997]** de flux de chaleur latente mesurés différents pour une zone de forêt et de savane en jachère au Sahel. Plus récemment, l'importance du rôle de la végétation a été confirmée par **[Ramier et al., 2009]** qui ont montré qu'au Sahel les flux d'évapotranspiration d'un champ en jachère, ou cultivé avec du mil, ne réagissaient pas de la même manière aux variations de la pluviométrie. A partir des mesures d'évapotranspiration réalisées au Bénin sur les sites de Nalohou (mosaïque de cultures et jachères) et Béléfoungou (forêt claire), **[Mamadou, 2014]** a mis en évidence une évapotranspiration plus importante pour le site de forêt qu'en zone cultivée. Elle avait cependant soulevé le problème de la quantité importante de lacunes dans les mesures d'évapotranspiration ainsi que le fait que l'ensemble des années de mesure présente une pluviométrie supérieure à la moyenne. Sur la même région **[Guyot, 2010]** estime l'ETr à 83 +/- 10% du cumul annuel des précipitations en 2008 à partir de mesures scintillométriques. Des estimations de l'ETr ont aussi été réalisées à l'aide de modèle, c'est le cas notamment de **[Le Lay, 2006]** qui compare les modèles GR4J et TOPAMMA. Ces modèles proposent une estimation des différents termes du bilan hydrologique (écoulement, stockage et évapotranspiration) par équilibre des masses d'eau. Les résultats de ces modèles donnent une bonne estimation du débit à l'exutoire dont les valeurs sont proches des débits mesurés. En revanche les modèles divergent sur la répartition du stock d'eau du sol et de l'évapotranspiration ; le terme d'évapotranspiration variant de 40 à 60%. Une récente étude d'intercomparaison de modèles confirme que ces écarts sur les estimations de l'ETr atteignent 25% en climat soudanien **[Getirana et al., in press]**. Ces incertitudes sont connues de longue date, les études qui ont été réalisées en Afrique de l'Ouest montrent des résultats qui varient de 40 à 80% des précipitations **[Guyot et al., 2012 ; Richard et al., 2013]**. La compréhension de ce terme est donc d'une importance majeure.

L'objectif de ce mémoire est l'étude de l'impact du couvert végétal sur l'ETr à l'aide d'une méthode simple basée sur les recommandations de la FAO-56 **[Allen et al., 2006]**. Cette méthode passe par la modélisation d'une évapotranspiration de référence (ET_0) calculée à partir des équations de Penman-Monteith et pondérée par un coefficient (K_r) prenant en compte le stress hydrique et le développement de la végétation. L'objectif est de calculer l'ETr sur les sites de Nalohou et Béléfoungou à un pas de temps fin (30 minutes) sur une période de neuf années de sorte à prendre en compte des pluviométries contrastées. Cette modélisation a nécessité l'utilisation de variables météorologiques qui dans notre cas sont issues des mesures de l'observatoire AMMA-CATCH. Dans un premier temps il a donc été nécessaire de mettre en place une méthode permettant de compléter les lacunes dans les données météorologiques de sorte à assurer une modélisation continue de l'ETr. Nous avons ensuite appliqué la méthode de la FAO-56 aux années 2007 à 2015. Les résultats de cette modélisation ont été comparés avec les mesures d'évapotranspiration de terrain d'une part, et avec les résultats d'une modélisation à base physique (ParFlow) développée par **[Maxwell et Miller, 2005]** de sorte à estimer la qualité de notre modèle. Les variations

interannuelles d'ETr ont ensuite été comparées entre le site de Nalohou et Béléfoungou pour des années à pluviométries contrastées.

2 Matériel et méthode

2.1 Sites d'études

2.1.1 Cadre général

La bande soudanienne présente un climat caractérisé par un régime de précipitation principalement contrôlé par la migration de la zone de convergence intertropicale (ITCZ) [Flaounas et al., 2012]. Il en résulte une répartition inégale des pluies au cours de l'année ce qui fait que l'on qualifie l'année hydrologique en termes de saison des pluies (généralement de fin juillet à septembre) et saison sèche dont la durée est variable suivant la définition utilisée et correspond en général aux mois de décembre à septembre (figure 1).

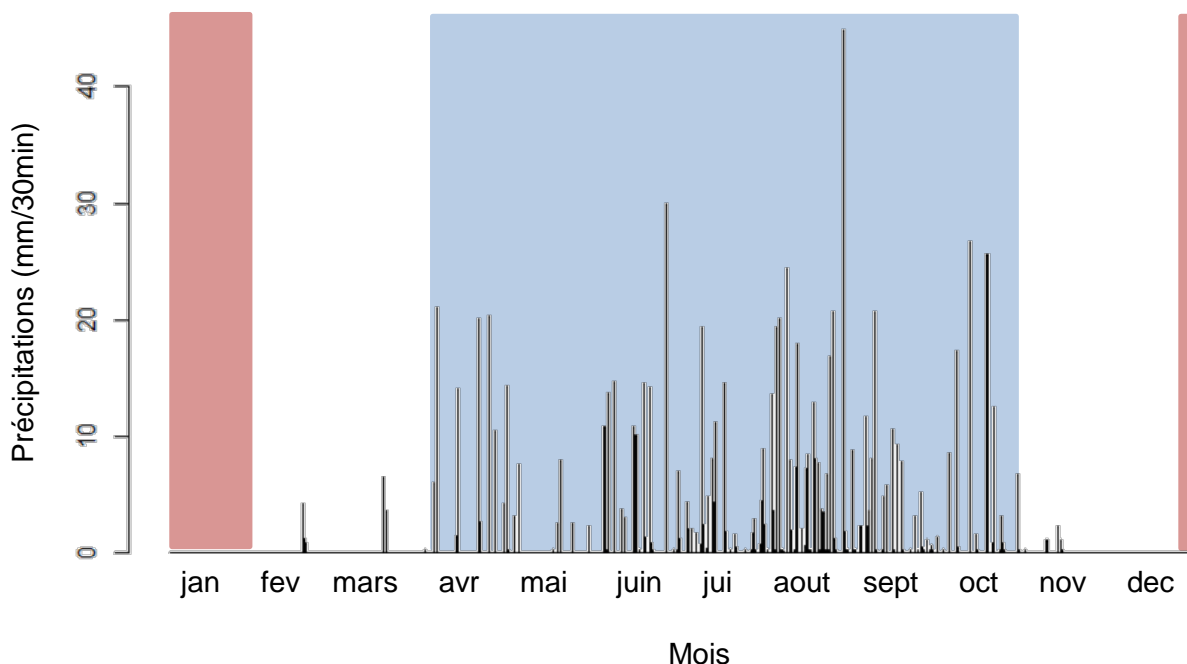


Figure 1 : Précipitations au pas de temps 30 min pour l'année 2015 au site de Nalohou (Bénin). Les fonds rouges et bleus indiquent les saisons sèches et humides.

Le vent est lui aussi contrôlé par la migration de l'ITCZ dont on distingue en général deux régimes dominants. Lorsque l'ITCZ se trouve au Sud, l'Harmattan apporte un air très sec car il vient du Nord-Est (désert du Sahara), c'est la saison sèche. A l'opposé, lorsque l'ITCZ migre au Nord, le vent arrive du Sud et sera donc chargé en humidité accumulée au-dessus de l'océan [Richard et al, 2013]. Ces phénomènes participent à la présence d'un gradient de précipitation Nord - Sud dans la région avec de fortes précipitations le long de la côte Sud dont le cumul annuel décroît lorsque l'on se dirige vers le nord (Figure 2).

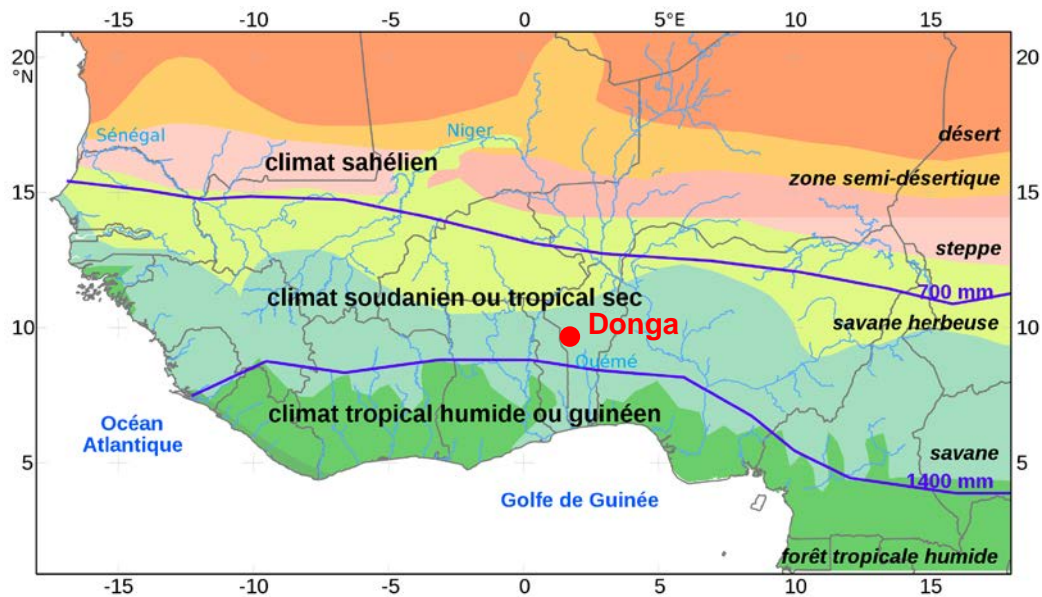


Figure 2 : Répartition de la précipitation (iso-courbe en violet) et de la végétation en Afrique de l'Ouest. Les contours noirs représentent l'emprise des sites de mesures de l'observatoire AMMA-CATCH, carte obtenue à partir du travail de [Jabot-Robert, 2012].

Ce gradient de précipitation contrôle un gradient de végétation lui aussi orienté Nord – Sud allant de la forêt tropicale pour les zones de fortes précipitations à des zones désertique au Nord. Cette étude porte sur le site soudanien qui a une végétation naturelle caractérisée par des forêts claires à *isoberlinia* et des zones cultivées qui alternent culture et jachère. A l'intérieur du site du Bénin, le bassin versant de la Donga (590km²) concentre les études de processus sur ces deux types d'occupation des sols.

2.1.2 Bassin versant de la Donga

Cette étude porte sur les mesures de quatre stations météorologiques situées au Bénin dans le bassin versant de la Donga (586 km² ; Figure 3). Cette région a été choisie comme zone d'étude car elle présente un comportement typique de la bande soudanienne [Paturel et al., 1997 ; Servat et al., 1999 ; Le Barbé et al., 2002]. Le relief y est peu marqué avec des pentes moyenne de 1.7 m/km au niveau de la rivière principale [Le Lay et al., 2008]. Les précipitations moyennes annuelles y sont de 1190 mm (période 1950-2002) avec 65% des précipitations entre les mois de Juillet et de Septembre [Le Lay et Galle, 2005]. La majorité des précipitations se font durant la saison des pluies sous forme de système convectif de méso-échelle [Lawin, 2007]. Du fait de ce régime de précipitation, les écoulements du bassin de la Donga sont intermittents, on observe en général des écoulements à l'exutoire de juin à novembre [Peugot et al., 2011 ; Zannou, 2011].

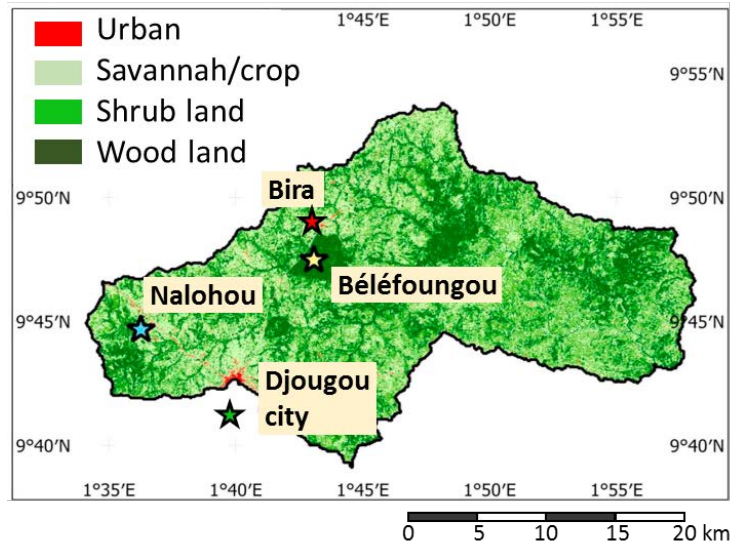


Figure 3 : Localisation des différentes stations de mesure du bassin de la Donga.

Les stations de mesure ont été réparties de sorte à couvrir les différents types de végétation représentatifs de l'ensemble du bassin versant (Figure 3). Le site de Béléfoungou est une forêt claire¹ protégée, d'une dizaine de km². Elle est composée d'arbres d'une quinzaine de mètres de hauteur et d'une strate herbacée qui se développe en saison des pluies pour atteindre une hauteur de 50 cm (S. Galle, communication personnelle, 2016). La station de Nalohou est entourée d'une mosaïque de parcelles cultivées ou en jachères, dont la hauteur peut atteindre 3m en fin de saison des pluies (Figure 3). Dans cette région, les principales cultures sont les céréales (sorgho, mil et maïs), les tubercules (igname et manioc) et le coton [Mamadou, 2014]. Les arbres sont conservés pour leurs propriétés (karité, manguier, baobab) et on les trouve dans les zones cultivées, au milieu des champs. La station de Bira est installée dans une jachère arborée et celle de Djougou a été incorporée à une station Météorologique de la ville de Djougou.

¹ Forêt claire (*woodland*) définie par [White, 1986] : peuplement ouvert d'arbres de 8 à 20 m dont le recouvrement est au moins de 40%. En sous-bois la strate herbacée héliophile est généralement continue.

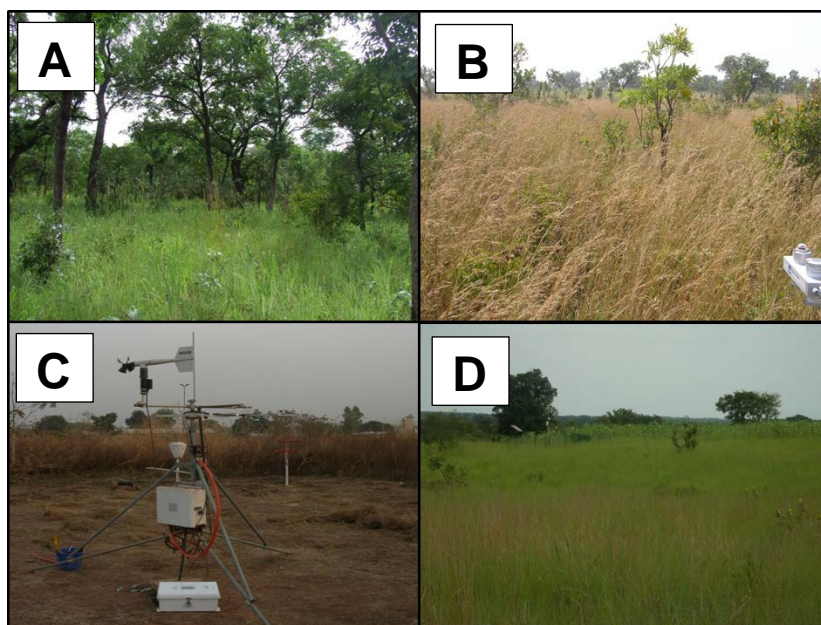


Figure 4 : Stations de mesures situées à : **A** Béléfoungou, **B** Bira, **C** Djougou, **D** Nalohou. Photographies de S. Galle.

2.1.3 Mesure des variables climatologiques

Les différentes composantes du bilan radiatif (R_{net} , SW_{in} , LW_{in}) sont mesurées par un CNR1 (Kipp & Zonen) à Nalohou et un NRLite (Kipp & Zonen) puis un CNR4 (Kipp & Zonen) depuis 2012 à Béléfoungou. La température de l'air, l'humidité relative, la pression atmosphérique et la vitesse du vent sont mesurées par un WXT510 (Vaisala). Les abris à ventilation naturelle ont été remplacés par des abris à ventilation contrôlée en 2013 à Nalohou (2014 à Béléfoungou). L'ensemble des instruments de mesures est récapitulé en Annexe I. Ces mesures ont débuté en 2003 et sont disponibles jusqu'en 2015. Certains appareils de mesure n'ont pas été réparés ou renouvelés immédiatement après leur panne pendant cette période. C'est le cas par exemple du capteur de pression de Béléfoungou qui ne fournit plus de mesure depuis 2013. De plus la majorité des appareils fonctionnent sur batterie alimentée par panneaux solaires, il arrive donc que certains appareils cessent temporairement de fonctionner ce qui introduit des lacunes de longueur variable au sein des jeux de données. Ces lacunes représentent au total 24% des mesures avec une longueur moyenne de 5 jours. Cependant la longueur des lacunes est fortement variable avec un écart type de 21 jours. La valeur médiane pour la longueur des lacunes est de 5 heures ce qui met en évidence une fréquence d'occurrence plus importante pour les lacunes de courte durée. La fréquence des lacunes ne dépend pas de la saison, en revanche l'impact du cycle journalier est clair avec 72% des lacunes durant la nuit. Il a donc été nécessaire de combler ces lacunes de sorte que les variables météorologiques soient continues dans le temps.

2.1.4 Mesure du stock d'eau

Les mesures d'humidité du sol sont réalisées en continu à l'aide de sondes CS616 (Campbell Sci.) sur les sites de Béléfougou et Nalohou à des profondeurs de 5, 10, 20, 40, 60 et 100 cm. Cela permet d'obtenir, via une interpolation linéaire, le stock d'eau de 0 à 30 cm et de 0 à 1 m. Les données sont disponibles à un pas de temps de 30 minutes sur une période allant de 2006 à 2015.

Dans cette étude, il a été considéré que le stock d'eau utile à l'évaporation se situe en surface, entre 0 et 30 cm. Dans le cas de la transpiration, la présence de racine en profondeur justifie la prise en compte de stock plus profond allant de 0 à 1 mètre dans notre cas. Cette profondeur peut sembler faible si on la compare aux profondeurs que peuvent atteindre les racines des arbres notamment dans la zone de Béléfougou où la nappe atteint par endroit une profondeur de 20 mètres. Cependant il s'agit d'un bon compromis entre la disponibilité des mesures et le fait que dans cette région, environ 80% des racines se situent dans les 50 premiers centimètres du sol [Awessou et al., 2016].

2.1.5 Estimation de l'indice foliaire

Le LAI (indice foliaire) représente le rapport de surface couvert par des plantes pour une surface de sol unitaire. Les mesures de LAI sont obtenues au pas de temps journalier sur la base des données satellite SEVIRI (3*3 km²) calibrées avec des mesures *in situ*, basées sur des photographies hémisphériques suivant la méthode proposée par [Weiss et al., 2004]. La station de Nalohou est centrée au milieu d'un pixel dont la valeur représente bien la dynamique du LAI environnant (S. Galle, communication personnelle, 2017). Cependant dans le cas du site de Béléfougou, le pixel du satellite n'est pas centré sur la forêt et intègre donc en partie la dynamique des cultures avoisinantes. Le choix a donc été fait d'utiliser à la place les résultats obtenus pour la forêt classée de l'Ouémé supérieur située à 40 km, présentant un couvert similaire à la forêt de Béléfougou.

Les données de LAI pour les sites étudiés ne sont disponibles que sur les années 2007 à 2013, alors que les données météorologiques sont disponibles jusqu'en 2015. Un LAI climatologique a été calculé pour les sites de Nalohou et de Béléfougou. Ce LAI est obtenu par moyenne des sept années disponibles de sorte à modéliser l'ETR pour les années 2007 à 2015. Nous reviendrons (chapitre 3.3.2) sur l'impact de cette approximation sur le calcul de l'ETR par la méthode FAO-56.

2.1.6 Mesure de l'évapotranspiration

Cette étude se base sur les mesures d'évapotranspiration par Eddy-covariance qui ont été réalisées de 2008 à 2010 sur les sites de Nalohou et Béléfougou (une partie de l'année 2007 est aussi disponible à Nalohou). Cette technique permet d'obtenir une mesure des flux de chaleur sensible et latente (qui correspond à l'évapotranspiration) pour une zone donnée. Pour ce faire on mesure à l'aide d'un anémomètre sonique couplé avec un analyseur de gaz les variations haute fréquence (20 Hz) du vent, de la température et de l'humidité de l'air. Il est difficile de maintenir de tels

équipements dans des zones tropicales humides où les capteurs, gourmands en énergie, doivent être autonomes en énergie et où l'ennuagement est important. C'est pourquoi il existe des lacunes dans les données qui représentent au total 57% des mesures.

La sous-estimation de l'évapotranspiration par la méthode d'eddy covariance est bien connue [Aubinet et al., 2012]. En quantifiant la fermeture du bilan radiatif [Mamadou et al., 2014] ont mis en évidence une sous-estimation des mesures d'évapotranspiration de 16% pour le site de Nalohou et 12% à Béléfoungou. Le choix a donc été fait d'appliquer un coefficient de 12% et 16% aux mesures d'évapotranspiration de sorte à ne pas propager de biais.

2.2 Modèle de la FAO-56, équation de Penman-Monteith

2.2.1 Calcul de l'évapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence (ET_0) est l'évapotranspiration qu'aurait une surface de gazon située dans les mêmes conditions atmosphériques sans limitation d'eau, elle qualifie la demande atmosphérique. Dans cette étude, nous avons suivi les recommandations de la FAO-56 qui conseille l'utilisation de l'équation de Penman-Monteith pour le calcul de l' ET_0 . Cette méthode requière en tout cinq variables météorologiques qui sont : la température et l'humidité relative de l'air, la pression atmosphérique, la vitesse du vent et le rayonnement net. Ces variables ont été gapfillées (voir chapitre 2.4) de sorte que nous avons des données en continu sur l'ensemble de l'année avec un pas de temps de la demi-heure.

$$ET_0 = \frac{0.408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{37.5}{3600 * (T + 273)} * u * (e_w - e_a) * \Delta t}{\Delta + \gamma * (1 + \frac{r_s}{208} * u)} \quad \text{Equation 1}$$

Avec ET_0 : L'évapotranspiration de référence (mm/h)

Δ : La pente de la courbe de pression de vapeur saturante (kPa/°C)

R_n : Le rayonnement net à la surface du sol (W/m²)

G : Le flux de chaleur dans le sol (MJ/m²/jour)

γ : La constante psychrométrique égale à $0.665 * 10^{-3} * P$ (kPa/°C)

T : La température de l'air (°C)

u : la vitesse du vent à 2m (m/s)

e_a : La pression de vapeur (kPa)

e_w : la pression de vapeur saturante (kPa)

Δt : pas de temps de nos mesures (s)

r_s : la résistance stomatique égale à 50 s/m le jour et 200 s/m la nuit [Allen et al., 2006]

Le vent considéré à Béléfougou est celui mesuré à 18m.

2.2.2 Coefficients culturaux

Une fois l'ET₀ calculé, il a été possible de calculer l'évapotranspiration réelle (ET_r ou ET_{c adj}). Cela implique la prise en compte d'un certain nombre de limitations qui sont la teneur en eau du sol effectivement disponible, le développement de la végétation et sa capacité à utiliser l'eau du sol qui dépend des espèces (condition non-normalisée).

$$ET_r = ET_0 * K_c = ET_0 * (K_{cb} * K_s + K_e) \quad \text{Equation 2}$$

Pour cela la FAO préconise l'utilisation de trois coefficients permettant de moduler l'ET₀. K_{cb} représente l'état de développement de la plante, K_s permet de prendre en compte l'effet du stress hydrique sur les plantes et K_e prend en compte l'impact des variations de la teneur en eau du sol sur l'évaporation.

Tableau 1 : Table récapitulative de l'ensemble des coefficients utilisés pour le calcul de K_c

	Nalohou	Béléfougou
végétation		
Hmax : hauteur maximal atteinte par la végétation au cours de l'année	3 m	15 m
Kcb-full : valeur maximale de Kcb obtenue lorsque le développement des plantes est maximal	1.2	1.2
Kc-min : valeur minimale de Kcb au cours de l'année	0.15	0.15
coefficient extinction de la lumière sous le couvert végétal	0.7	0.7
sol		
Ks-min : borne inférieure du coefficient limitant le développement des plantes face au stress hydrique	0.18	0.35
Ks-max : borne supérieure du coefficient limitant le développement des plantes face au stress hydrique	0.77	0.78
RAW : valeur en dessous de laquelle le stress hydrique impacte la transpiration des plantes	91.6 mm	71.2 mm
Kr-min : borne inférieure du coefficient appliqué à l'évaporation lorsque la teneur en eau est minimale	0	0
Kr-max : borne supérieure du coefficient appliquée à l'évaporation lorsque la teneur en eau est maximale	0.97	1
REW : valeur en dessous de laquelle l'évaporation est limitée par la teneur en eau du sol	30.2 mm	11.1 mm

La description complète de chacun de ses coefficients est disponible dans le guide en ligne de la FAO-56 (<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents>). Dans notre cas, Hmax qui correspond à la hauteur de la végétation a été fixé sur notre expérience des sites de Nalohou et Béléfougou. Les coefficients Kcb-full, Kc-min et le coefficient d'extinction ont été choisis grâce aux recommandations de la FAO-56. Les paramètres du sol font l'objet d'un chapitre à part (chapitre 3.3.1) qui détaille les différentes méthodes d'optimisation mises en place pour ces paramètres.

2.3 Modèle à base physique ParFlow

ParFlow est un logiciel libre à base physique [Maxwell et Miller, 2005] permettant une modélisation de l'ensemble des termes du cycle hydrologique dans les bassins versants. Il résout les équations de Richards et prend en compte la géologie et la topographie complexe incluant des processus de surface. Il a été évalué sur le site de Nalohou par rapport à chacun des termes et reste cohérent pour chacun d'entre eux (Hector, comm. Pers., 2017). Ce modèle permet de plus la mise en place d'expériences numériques telles que par exemple, à partir d'un bassin versant aux caractéristiques physiques connues, regarder l'impact d'un changement de végétation. Ce procédé a été appliqué au bassin versant de Nalohou simulant ainsi un bassin versant cultivé (mosaïque de cultures) ou le même bassin couvert de forêt claire. Les résultats de cette expérience ont été comparés aux résultats obtenus avec le modèle de la FAO-56.

2.4 Méthode de gap filling

Une méthode de gap filling a été mise en place, appliquée et testée sur les variables météorologiques nécessaires au calcul de l'évapotranspiration, c'est-à-dire la température de l'air, l'humidité relative, la pression atmosphérique, la vitesse du vent, le rayonnement net ainsi que le rayonnement incident de courtes et grandes longueurs d'ondes. Six techniques ont été choisies puis comparées qualitativement. Les techniques donnant les meilleurs résultats ont ensuite été appliquées à l'ensemble des jeux de données. Les paragraphes ci-après présentent les différentes méthodes testées pour réaliser le gap filling, elles vont de la plus simple à la plus élaborée.

La correction par **valeur encadrante** consiste à remplacer les données manquantes par la moyenne des quatre valeurs précédant et suivant la lacune.

La correction par **moyenne climatique** permet de combler les lacunes par les valeurs de la moyenne climatique calculée sur 10 ans. On réalise ensuite une moyenne glissante de 21 valeurs. La moyenne glissante d'une demi-heure donnée est obtenue à partir des données mesurées à la même heure pour les 20 jours encadrant la valeur calculée. La justification de l'utilisation d'une fenêtre de 21 jours se trouve au chapitre 3.1.1.

La correction par **moyenne climatique corrigée** se base sur la moyenne climatique décrite ci-dessus. Afin de prendre en compte la variabilité interannuelle, les valeurs de la moyenne climatique sont pondérées par l'écart moyen entre les valeurs mesurées et climatiques encadrant la lacune. Cela permet par exemple de prendre en compte qu'une année est plus chaude que l'année moyenne et ainsi augmenter les valeurs de la moyenne climatique.

Les données de ré-analyse **MERRA** (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) sont issues de ré-analyses atmosphériques réalisées par la NASA et basées sur le GEOS-5 (Goddard Earth Observing System Model, Version 5). La résolution spatiale est d'un demi-degré en latitude et 2/3 de degré en longitude avec une résolution temporelle d'une heure pour

l'ensemble des variables de cette étude, excepté le rayonnement net pour lequel cette méthode n'est pas disponible.

La correction par **corrélation inter-sites** suppose que les variables climatiques mesurées entre les différents sites soient étroitement liées. Cette hypothèse est rendue réaliste par le fait que les quatre stations sont distantes de moins de 15 km. Les coefficients de corrélation entre toutes les stations ont été calculés par régression linéaire pour l'ensemble des variables. Les stations sont ainsi triées par ordre de meilleure corrélation avec la station que l'on étudie. Les lacunes sont ensuite complétées avec les valeurs de la station ayant le meilleur coefficient de corrélation, corrigées par les paramètres de régression. Puis, si il reste des lacunes, on utilise les valeurs de la station ayant le deuxième meilleur coefficient de corrélation. Cette opération est répétée jusqu'à ce que l'ensemble des lacunes soient comblées ou que toutes les stations aient été utilisées.

La dernière méthode utilisée est une correction par **processus de Gauss**. Pour cela on suppose qu'une partie des variations du signal mesuré est due à des cycles (par exemple le cycle annuel des saisons, le cycle journalier de la température) qui se répètent de manière régulière dans le temps et peuvent être prévus. La seconde partie du signal provient de ce que l'on appelle du bruit et est issu de phénomène localisé dans le temps (par exemple l'impact d'un nuage sur le rayonnement incident). Ces deux parties du signal ont été dissociées par transformée de Fourier ce qui a permis d'obtenir un patron général représentant les variations annuelles de chaque variable. La soustraction de ce patron aux mesures permet d'isoler le résidu qui peut alors être considéré comme issu d'un processus stationnaire ergodique. On applique ensuite le processus de Gauss aux résidus pour compléter les lacunes. La fonction d'autocovariance spécifie le poids à donner à chaque valeur lors de l'estimation d'une valeur manquante. Une fois le résidu complété de cette manière, on lui ajoute le patron et on peut recréer le signal continu dans le temps.

2.5 Choix des critères de performance

Différents indices ont été utilisé pour évaluer la qualité de chaque méthode de gapfilling. Les indices présentés ci-dessous ont tous en commun l'avantage d'une certaine maniabilité puisqu'ils ont pu être appliqués à chaque pas de temps où des mesures étaient présentes. Faisant ainsi abstraction des zones de lacunes.

2.5.1 Erreur quadratique moyenne

L'erreur quadratique moyenne (MSE) est l'un des indicateurs les plus utilisé actuellement pour l'évaluation de modèles. Il se calcule comme suit :

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} * \sum_{t=1}^n (X_{s,t} - X_{o,t})^2 \quad \text{Equation 3}$$

Avec n le nombre total de valeur, $X_{s,T}$ les valeurs simulées par le modèle à chaque pas de temps et $X_{o,T}$ les valeurs observées à chaque pas de temps. Cet indice varie de [0 à +inf.] où zéro représente

un écart nul entre le modèle et les mesures. Les valeurs du MSE dépendent de l'unité de la variable utilisée ce qui exclut toute comparaison entre les variables. La mise au carré de l'écart aux mesures implique qu'une sous-estimation du modèle aura le même impact sur le MSE qu'une surestimation. De plus, le poids donné aux erreurs n'est pas linéaire, ainsi une forte erreur à un pas de temps influencera d'avantage le MSE que plusieurs petites erreurs dont la somme serait équivalente à l'amplitude de la première erreur.

2.5.2 Critère de Nash-Sutcliffe efficiency

Le critère de Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) est défini en 1970 par Nash et Sutcliffe dans le but de d'évaluer la qualité de modèles hydrologiques. Il est défini comme suit :

$$NSE = 1 - \frac{MSE}{\sigma_0^2} \quad \text{Equation 4}$$

Son calcul est basé sur le MSE vu ci-dessus et sur l'écart type de la mesure. Le NSE est adimensionnel et varie de $[-\infty, 1]$, une valeur de 1 représentant un modèle parfait tandis qu'une valeur négative indique que le modèle introduit une erreur supérieure à l'écart type des mesures. Un NSE négatif indique donc que le modèle est moins efficace que la moyenne des mesures et ne doit donc pas être utilisé.

2.5.3 Coefficient de détermination

Le coefficient de détermination r^2 est un indicateur qualité de la prédiction d'une régression linéaire. Il caractérise la co-fluctuation des variables et indique le pourcentage de variance expliquée. Cet indicateur est calculé comme suit :

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Equation 5}$$

Avec r^2 le coefficient de détermination, y les valeurs mesurées, \hat{y} les valeurs prédites et \bar{y} la moyenne des mesures.

2.5.4 Kling-Gupta efficiency (KGE)

L'indice Kling-Gupta Efficiency (KGE) a été introduit par [Gupta et al., 2009] dans le but de produire un indice unique qui combine les informations obtenues par la corrélation, le biais et la variabilité des modèles. Il est formulé comme suit :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{Equation 6}$$

Avec r le coefficient de corrélation, $\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{mesu}}$ et $\beta = \frac{\overline{sim}}{\overline{mesu}}$ le ratio de la moyenne de la simulation et des mesures. Le KGE est adimensionnel et varie de 1 pour un modèle parfait à moins l'infini. L'utilisation du KGE permet de limiter certains problèmes associés à l'utilisation d'un seul indice tel

que par exemple la surestimation de la qualité des modèles par le NSE pour les variables à forte variabilité saisonnière, le biais qui n'est pas détectable avec le coefficient de corrélation et la coiffuctuation qui n'est pas qualifiée par le MSE.

2.6 Choix des méthodes de gap filling

Les différentes méthodes vues ci-dessus ont ensuite été évaluées pour des lacunes de longueur variable. Pour cela nous avons utilisé l'année de mesure 2009 qui ne présente pas de lacune. Des lacunes factices y ont été créées en supprimant une partie des mesures de sorte à obtenir un jeu de données composé d'une alternance de mesures et lacunes de longueur identique. Au total neuf jeux de données ont ainsi été créés avec des lacunes de longueurs 30 min, 1 h, 2 h, 6 h, 12 h, 1 j, 3 j, 6 j, 10 j.

Chaque méthode de gap filling a ensuite été appliquée aux données présentant des lacunes (exemple de résultat au chapitre 3.1.2). Les résultats de l'opération de gap filling ont été comparés aux jeux de données initiales de l'année 2009 à l'aide de différents indices (MSE, NSE, KGE). C'est au final le KGE (Kling-Gupta efficiency) qui a été retenu comme critère de sélection puisqu'il intègre à la fois le critère de Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) et l'erreur quadratique moyenne (MSE) [Gupta et al., 2009].

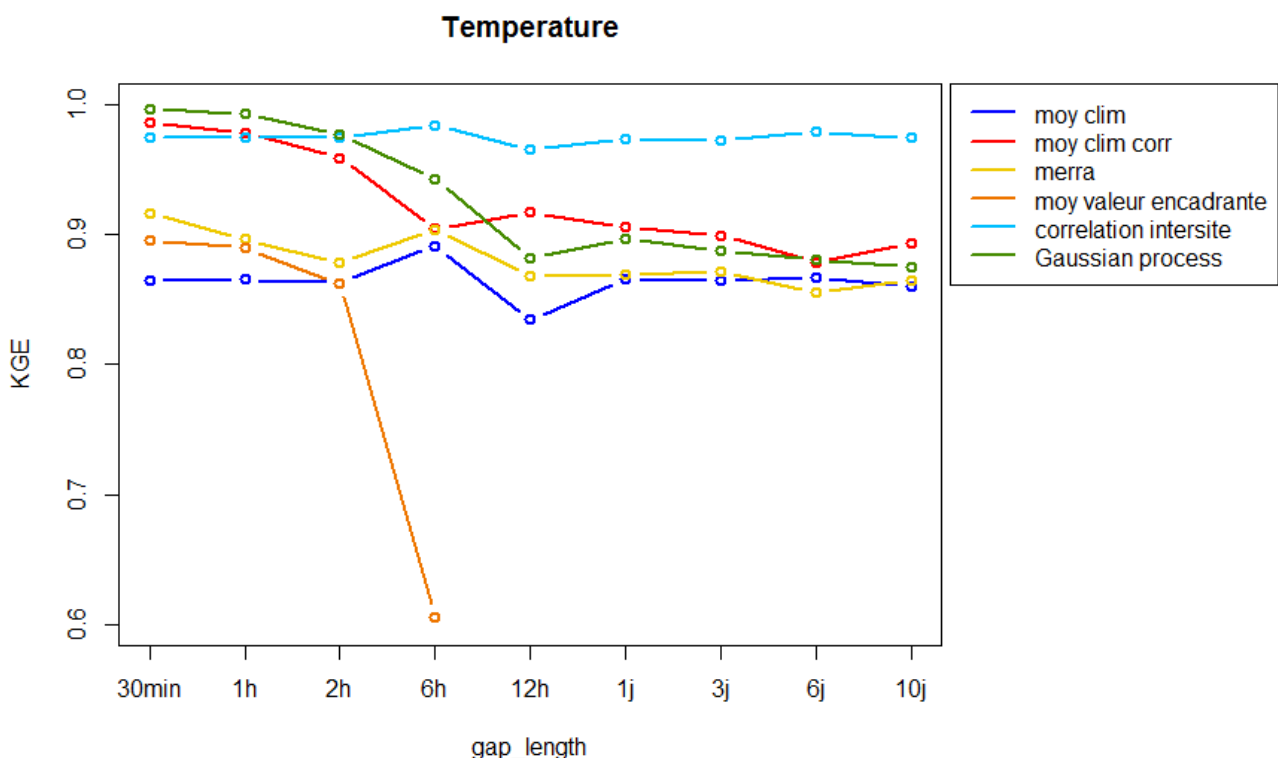


Figure 5 : Gap filling de la température : Variation du KGE pour différent type de correction en fonction de la longueur des lacunes.

La Figure 5 montre les performances (KGE) des différentes méthodes de gap filling appliquées à la température pour différentes longueurs de lacunes allant de 30 minutes à 10 jours. On peut constater

que certaines méthodes de gap filling sont peu dépendantes de la longueur de la lacune, c'est le cas pour la corrélation intersites, la moyenne climatique et les données issues des ré-analyses MERRA. En effet ces méthodes de correction ne font pas appel aux données bornant les lacunes et leur qualité ne sera donc pas dépendante de la longueur du trou. A l'opposé on constate que les méthodes, qui utilisent ces données ont une chute de performance pour les lacunes supérieures à 2h puis se stabilisent au niveau d'un deuxième palier, atteint pour des lacunes supérieures à 12h. Le processus de Gauss et la moyenne climatique corrigée se stabilisent au niveau d'un deuxième palier, qui est proche de celui de la moyenne climatique non corrigée. La moyenne par valeur encadrante, qui a des performances initiales moins bonnes que les deux précédentes, se dégrade très fortement puis se stabilise vers $KGE = 0.2$. Cette valeur n'a pas été tracée pour faciliter la lisibilité du graphique. On remarque enfin que parmi les méthodes qui n'utilisent pas les données de la station ni celles de ses voisines, l'utilisation des réanalyses Merra est légèrement plus performante que la moyenne climatique. Mais on améliore le score de la moyenne climatique qui dépasse Merra à tous les pas de temps en la corrigeant avec les valeurs encadrantes.

Les résultats obtenus pour la température sont similaires à ceux obtenus pour les autres variables (Annexe II) : si la valeur absolue du critère de performance varie suivant les variables, le comportement relatif des différentes méthodes est similaire. Sur la base de ces résultats, nous avons mis au point un protocole de gap filling identique pour l'ensemble des variables. Ce protocole utilise trois niveaux de correction successifs qui assurent la création d'un jeu de données continu sur l'ensemble de l'année.

1. Si l'absence de données dure 1.5 heure ou moins (ce qui correspond au maximum à une succession de trois mesures manquantes), on utilise le processus de Gauss en utilisant les valeurs de trois jours précédants et suivants le trou (Gap1 de la Figure 6).
2. En cas de lacune supérieure à 1.5 heure, les données sont complétées en utilisant les corrélations intersites (Gap2). Dans l'exemple de la Figure 6 ci-dessus, la station ayant le meilleur coefficient de corrélation (station 2) est choisie pour compléter une partie des lacunes. Si cette station est elle-même en lacune, la meilleure station de référence suivante (station 3) est alors utilisée et participe au gap filling (Gap2 de la Figure 6). Ce processus est répété jusqu'à ce que l'ensemble des lacunes soit comblées où que l'on ait utilisé toutes les stations disponibles.
3. S'il reste des lacunes après ces deux étapes, c'est-à-dire si toutes les stations sont en lacune en même temps, les données seront complétées par moyenne climatologique corrigée qui montre les meilleures performances parmi les méthodes qui sont indépendantes des mesures locales (Gap3 de la Figure 6).

Finalement, trois méthodes ne sont jamais utilisées : la moyenne des valeurs encadrantes, les données climatiques non corrigées et les ré-analyses MERRA.

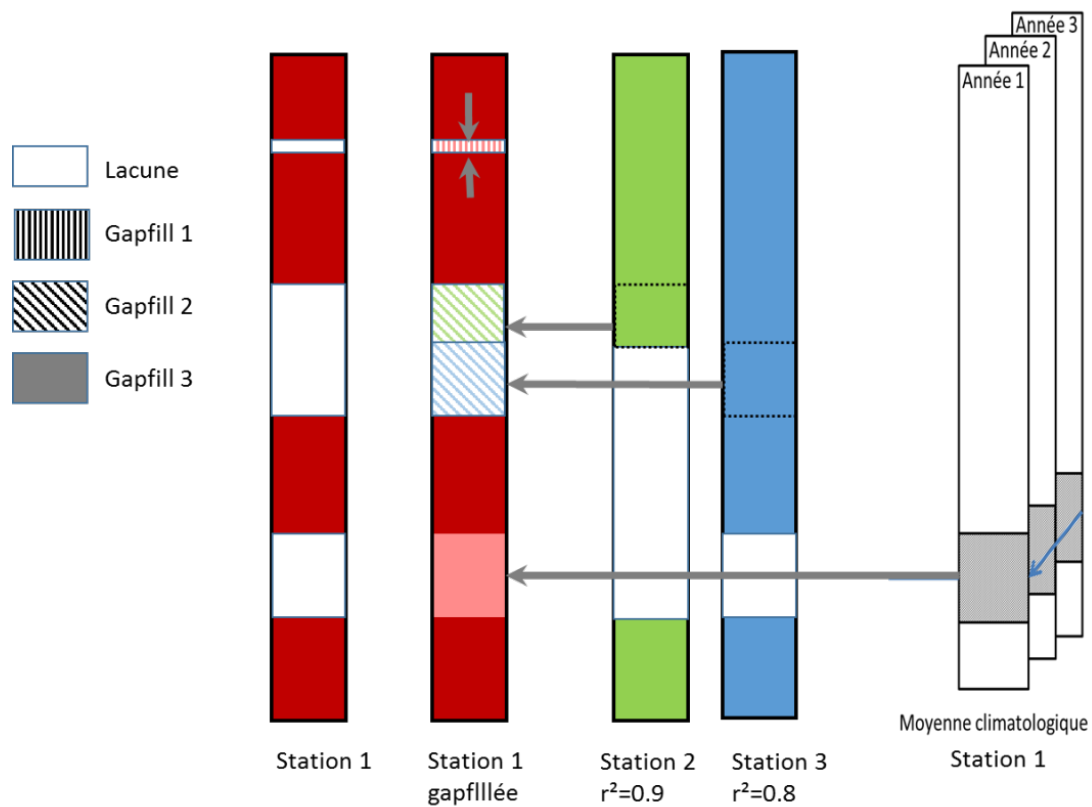


Figure 6 : Schéma récapitulatif des trois étapes servant à compléter les lacunes dans les fichiers de données météorologiques.

3 Résultats et discussions

3.1 Gap filling

3.1.1 Nombre de jours considéré pour la moyenne climatologique

Le choix de 21 jours pour la moyenne climatologique résulte d'un compromis entre la nécessité d'avoir suffisamment de valeurs pour calculer une moyenne climatologique cohérente et notre volonté de limiter le lissage du signal pour conserver la variabilité saisonnière. La présence de lacunes nous imposait un nombre de valeur d'autant plus important. Le choix de cette valeur a été justifié en calculant l'erreur quadratique moyenne entre la moyenne climatologique étudiée et les données réellement mesurées sur le terrain pour différentes gamme de valeurs (5, 11, 21, 31, 51). Ce processus a été répété pour l'ensemble des variables, ce qui nous a permis de trouver un optimum à 21 (Figure 7).

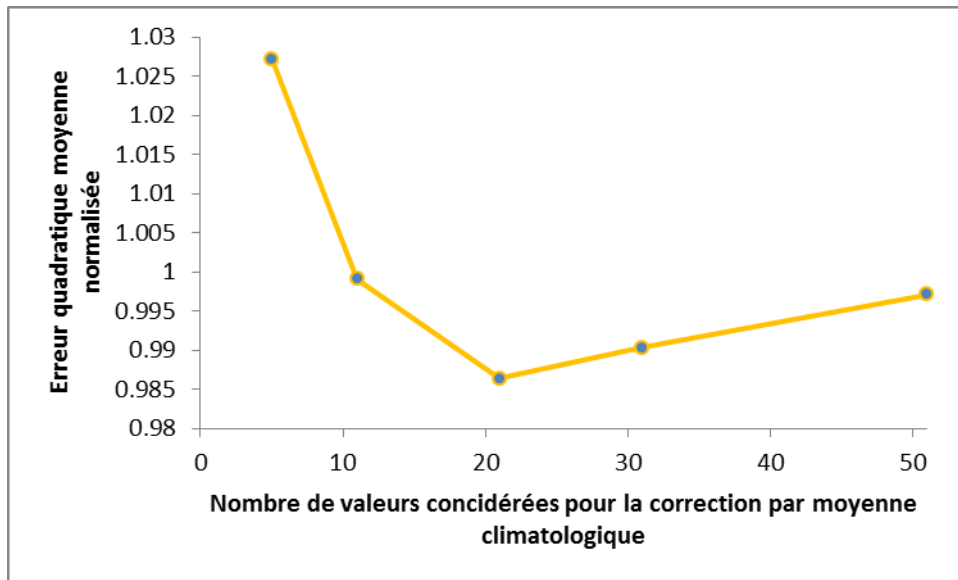


Figure 7 : Erreur quadratique moyenne de la moyenne climatologique en fonction du nombre de valeurs pour l'ensemble des variables. Les erreurs quadratiques ont été normalisées par rapport à leur moyenne afin de ne pas donner plus de poids aux variables présentant des valeurs plus importantes. L'erreur est minimale pour une durée de 21 jours.

3.1.2 Exemple de variable gap fillées

L'étude quantitative réalisée sur les fichiers corrigés des 9 années 2007 à 2015 montre que la correction par processus de Gauss (Gap1) ainsi que par moyenne climatique corrigée (Gap3) représentent chacune moins de 1% du gap filling réalisé. Ainsi la majorité (plus de 98%) des lacunes sont corrigées à l'aide de la corrélation intersites qui présente une bonne robustesse.

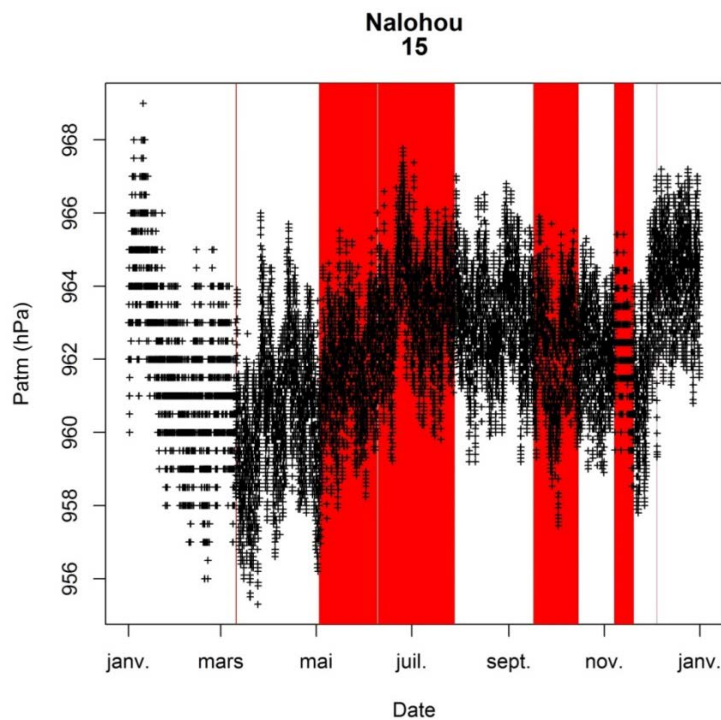


Figure 8 : résultat du gapfilling réalisé sur la pression atmosphérique mesurée à Nalohou en 2015. Les cadres rouges symbolisent les zones de lacunes initiales

La Figure 8 est un exemple de données de pression atmosphérique obtenues à Nalohou après gap filling. Les rectangles rouges représentent les zones où du gap filling a été effectué. Le graphique ne précise pas quelle méthode a été utilisée, mais cette information est disponible sur les fichiers de sortie (Tableau 2).

Remarque : au début du mois de Mars, il y a eu un changement dans la précision de l'appareil de mesure de pression atmosphérique à Nalohou. Le changement de précision des données gap fillées début novembre est due à une correction de type Gap 2 avec une station ayant un appareil de basse précision (Djougou). Les tableaux récapitulatifs du nombre de lacunes de chaque variable pour l'ensemble des années sont en Annexe IV.

Tableau 2 : récapitulatif du gapfilling de la pression atmosphérique à Nalohou : nombre de pas de temps en lacune (nb) et pourcentage des lacunes comblées par chaque méthode sur les 9 ans (%). La meilleure corrélation est obtenue avec la station de Djougou.

Nalohou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
Pression atm.	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	21	0	0	1049	134	5030	344	1	6178	12736	-
Gap1	0	0	0	2	0	6	1	1	4	14	0.1%
Gap2 (Bira)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
Gap2 (Bélé)	0	0	0	0	0	0	343	0	0	343	2.7%
Gap2 (Djougou)	21	0	0	1047	134	5024	0	0	6163	12389	97%
Gap3	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	0.1%

3.2 Variations interannuelle des précipitations

La Figure 9 montre comment varie le cumul annuel de pluie à Nalohou et Béléfoungou pour les années 2007 à 2015. Notre échantillon a une moyenne de 1315 mm avec un minimum observé de 980 mm et un maximum de 1708 mm, soit un écart de 728 mm (55% de la pluie annuelle moyenne), ce qui est important mais classique dans une région où la variabilité interannuelle est très importante. L'écart-type de notre échantillon est de 212 mm, le coefficient de variation de 16%. Les années étudiées contiennent trois années « humides » (2009, 2010, 2012) et deux années « sèches » (2011, 2013). La variabilité de notre échantillon est importante, ce qui permettra d'étudier la sensibilité de l'évapotranspiration à ce type de forçage. La moyenne interannuelle 2007-2015 est supérieure de 125 mm (10%) à celle mesurée pendant la période 1950-2002 (1190 mm), cette augmentation est conforme aux observations faites à plus grande échelle qui montrent une reprise du cumul annuel dans les années récentes.

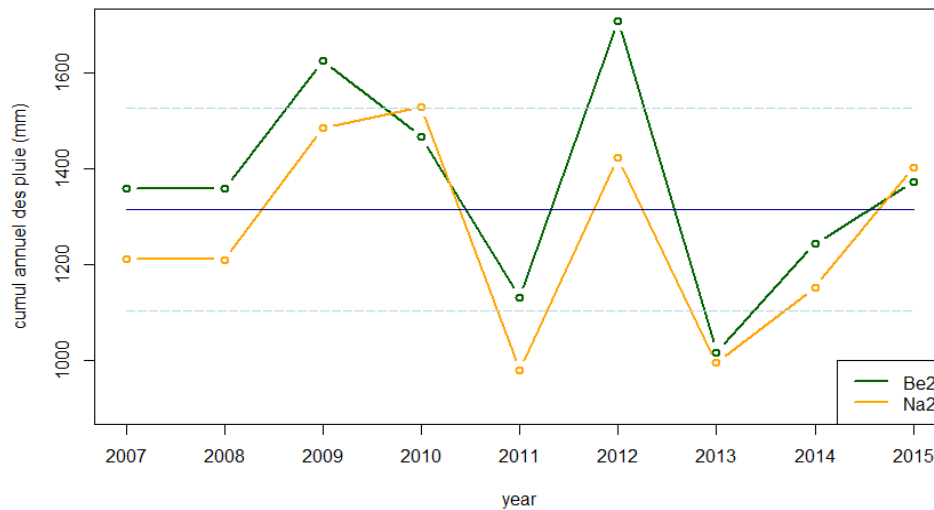


Figure 9 : Cumul annuel des précipitations pour les années 2007 à 2015. En vert la station de Béléfoungou et en jaune la station de Nalohou. La droite en mauve représente la moyenne des 2 sites pour les années 2007 à 2015 et les droites en bleu clair pointillé indiquent l'écart type autour de cette moyenne.

3.3 Evaluation du modèle de la FAO

3.3.1 Paramètres du sol

Dans cette étude nous avons fait le choix de caler les paramètres du sol avec les mesures des années 2008 à 2010. Pour ce faire nous avons tracé l'évapotranspiration mesurée en fonction de la teneur en eau du sol (Figure 10) et nous avons cherché les paramètres qui minimisent l'erreur quadratique moyenne avec le modèle (courbe rouge). Cela permet une optimisation de la qualité du modèle tout en gardant un sens physique, cette démarche a été évaluée par [Mutziger et al., 2005].

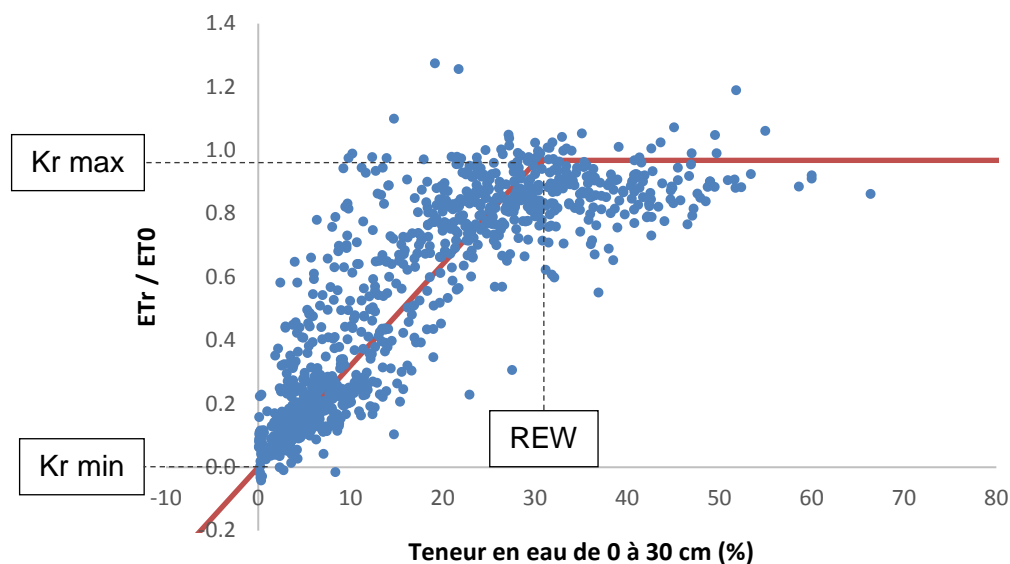


Figure 10 : Variation du rapport E_{Tr}/E_{T_0} en fonction de la teneur en eau (0-30 cm) pour le site de Nalohou : mesures (points bleus) et modèle FAO-56 calé sur les mesures (courbe rouge)

3.3.2 Sensibilité du modèle au LAI

L'impact de l'utilisation du LAI climatologique au détriment du LAI mesuré a été estimé en comparant l'évapotranspiration obtenue avec (i) le LAI mesuré et (ii) le LAI climatologique pour les années où nous disposons de mesures. Les résultats obtenus sont très proches ($KGE = 0.99$). Cela laisse supposer que bien que les variations annuelles du LAI aient une réelle importance sur les dynamiques d'évapotranspiration, les variations interannuelles sont peu significatives en termes de bilan hydrologique. Cette méthode a donc permis de calculer l'ETr des années 2014 à 2015.

3.3.3 Estimation de la qualité du modèle proposé par la FAO

Des mesures d'évapotranspiration par Eddy-covariance ont été réalisées de 2008 à 2010 sur les sites de Béléfoungou et Nalohou. Ces mesures ont permis une évaluation de la qualité du modèle proposé par la FAO. Le Tableau 3 récapitule pour les années 2008 à 2010 différents indices permettant l'évaluation du modèle.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif de la qualité du modèle de la FAO-56 par rapport aux mesures d'ETr à Béléfoungou et Nalohou pour les années 2008 à 2010.

	2008	2009	2010
écart moyen Be (mm)	-0.0074	-0.0129	-0.0165
écart moyen Na (mm)	0.0001	0.0056	0.0147
KGE Be	0.84	0.82	0.79
KGE Na	0.83	0.77	0.69
RMSE Be (mm)	0.042	0.049	0.050
RMSE Na (mm)	0.036	0.040	0.039

L'écart moyen correspond à la somme des valeurs modélisées moins les mesures, divisé par le nombre de valeurs mesurées au cours de l'année. On peut constater qu'en moyenne sur trois ans, l'écart moyen à Béléfoungou est presque deux fois supérieur à celui de Nalohou en valeur absolue. Il apparaît aussi que le modèle a une tendance à sous-estimer l'évapotranspiration à Béléfoungou alors qu'il le surestime à Nalohou.

Le KGE moyen du modèle par rapport aux mesures est égal à 0.82 pour Béléfoungou et 0.76 pour Nalohou. Ces valeurs sont acceptables et mettent en évidence certaines imperfections du modèle. On notera que si l'écart moyen est plus faible à Nalohou, le KGE est légèrement supérieur à Béléfoungou ce qui indique que les dynamiques du signal y sont au moins aussi bien représentées. Cette observation a été confirmée en traçant les courbes de corrélation (figure 11) de Béléfoungou et Nalohou. Elles mettent en évidence une absence de biais entre le modèle et les mesures (pente ≈ 1). La dispersion relativement importante ($r^2 \approx 0.8$) indique le fait que certains phénomènes ne sont pas bien pris en compte. Une partie de la dispersion peut être expliquée par l'alternance des saisons des pluies et saisons sèches. Une différence entre le modèle et les mesures peut être mise en évidence sur la courbe de Béléfoungou et dans une moindre mesure celle de Nalohou où le bas du nuage de corrélation est coupé à zéro. Cela indique le fait que les mesures d'évapotranspiration par Eddy-covariance sont impactées par les phénomènes de rosée (ETr négatif) que notre modèle ne simule pas.

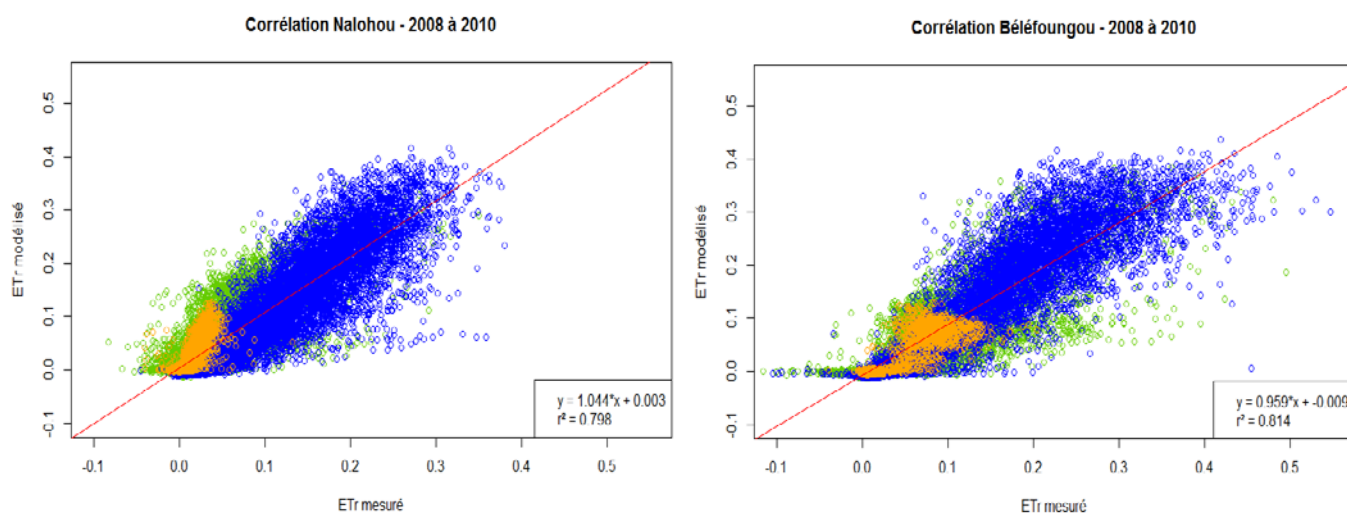


Figure 11 : Corrélation entre l'ETr (mm/30 min) mesuré et modélisé par la méthode de la FAO-56 sur les sites de Béléfoungou et Nalohou pour les années 2008 à 2010. Les points oranges correspondent à la saison sèche, les verts aux saisons de transition et les bleus à la saison des pluies définie par [Mamadou, 2014].

En moyenne le RMSE à Béléfoungou est légèrement supérieur à celui de Nalohou. Les valeurs de RMSE présentent une faible variation interannuelle (± 0.004 pour Béléfoungou et ± 0.002 à Nalohou). Le modèle est donc relativement stable dans le temps et apte à représenter avec une qualité similaire l'ensemble des années. Cela reste néanmoins soumise à certaines hypothèses fortes venant tout d'abord du fait que les paramètres du sol ont été calés de sorte à minimiser le RMSE pour les années 2008 à 2010 (voir chapitre 3.3.1). Il est donc possible que l'apparente stabilité du RMSE soit un artefact de cette opération. De plus, comme le montre la Figure 9, les années 2008 à 2010 sont soit proches de la moyenne (2008) soit des années humides (2009 et 2010) et ne contiennent pas d'année sèche. Il n'est donc pas possible dans ce cas d'estimer la qualité du modèle lors d'une année en fort déficit d'eau.

3.3.4 Estimation de la qualité du modèle proposé par la FAO par rapport à un modèle de référence

Les résultats du modèle simple de la FAO-56 ont été comparés aux sorties d'une modélisation à base physique, ParFlow, appliquée au site de Nalohou (B. Hector comm. Pers., 2017). La simulation a été réalisée pour les années 2007 à 2012. Comme le montre la Figure 9, l'année 2011 est une année de forte sécheresse, notamment pour le site de Nalohou ce qui permettra cette fois-ci d'évaluer le modèle lors d'une année sèche.

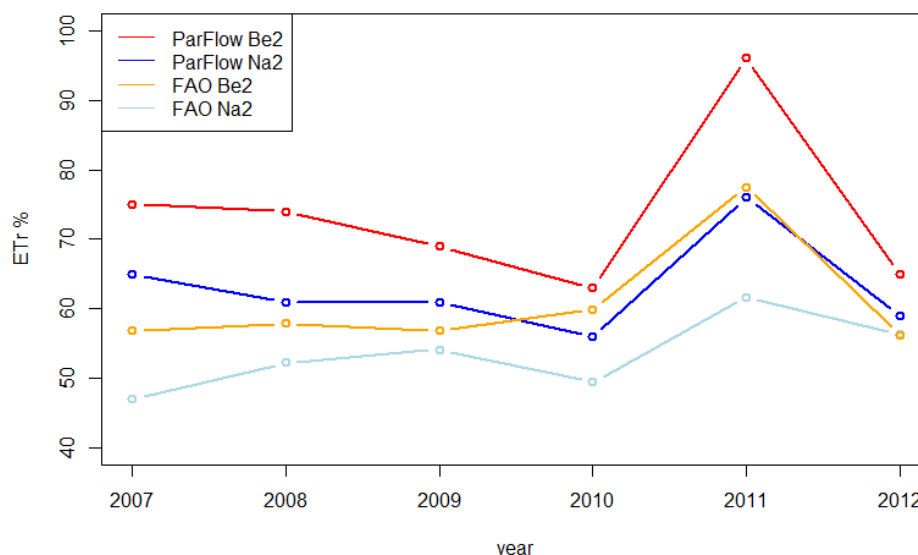


Figure 12 : ETr en pourcentage du cumul annuel de précipitation obtenu par modélisation ParFlow pour le site de Béléfougou en rouge et Nalohou en bleu. Ainsi que par le modèle de la FAO-56 sur les sites de Béléfougou en orange et Nalohou en bleu clair pour les années 2007 à 2012.

La Figure 12 montre les résultats de la simulation ParFlow pour le site de Béléfougou et Nalohou. On met en évidence que, si les modèles ont un écart systématique, ils s'accordent bien sur les variations de l'ETr (% pluie). Ainsi l'année sèche de 2011 présente pour les deux modèles un maximum d'ETr (% pluie). De même, l'écart entre la station de Nalohou et de Béléfougou est similaire (environ 10%) pour les deux modèles. La modélisation ParFlow trouve une évapotranspiration moyenne de 74% à Béléfougou et 63% à Nalohou (écart de 11%). Les résultats obtenus via le modèle de la FAO-56 sont en moyenne 61% à Béléfougou et 53% à Nalohou (écart de 8%). Cependant, le modèle de la FAO sous-estime systématiquement les valeurs d'évapotranspiration par rapport au modèle ParFlow d'une valeur moyenne de 12% pour chacun des sites. La comparaison avec les mesures a montré une absence de biais du modèle de la FAO. L'écart trouvé avec le modèle ParFlow provient donc soit d'une sous-estimation de l'ETr par les mesures soit d'une surestimation de l'ETr par le modèle ParFlow.

3.3.5 Conclusion

Le modèle de la FAO-56 basé sur les équations de Penman-Monteith permet une bonne simulation de l'évapotranspiration bien que certaines erreurs aient été mises en évidence. La corrélation avec les mesures montre une certaine dispersion des valeurs au pas de temps semi-horaire, mais pas de biais. Cependant la comparaison avec un modèle de référence montre une sous-estimation de l'ETR par la FAO-56. Cette différence peut être expliquée car les comparaisons n'ont pas été effectuées sur les mêmes périodes, le biais n'ayant pas pu être identifié lors d'années humides. De façon globale le modèle de la FAO coïncide bien avec les simulations Parflow. Ce modèle simple et rapide à mettre en œuvre est un outil capable de reproduire les variations interannuelles.

3.4 Comparaison de l'évapotranspiration entre Nalohou et Béléfoungou

En moyenne sur les 9 années étudiées, l'évapotranspiration sur le site de Béléfoungou est supérieure de 27% à celle du site de Nalohou (Tableau 4). Cette différence d'évapotranspiration n'est pas uniquement due à l'occupation des sols. Sur les années 2007 à 2015, le cumul de précipitation annuel est presque systématiquement plus important à Béléfoungou qu'à Nalohou (écart moyenne de 100 mm). Cependant, la Figure 13 laisse supposer que l'apport d'eau supplémentaire à Béléfoungou pour les années étudiées n'est pas suffisant pour expliquer l'écart d'évapotranspiration calculé puisqu'il est plus faible que la différence d'ETR entre les deux sites.

Tableau 4 : ETr des stations de Béléfoungou et Nalohou pour les années 2007 à 2015.

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	moyenne	Ecart type
ETr Be (mm)	773	787	923	879	877	960	1070	1176	1040	943	133
ETr Na (mm)	571	632	804	755	605	802	680	782	605	693	94
Pluie Be (mm)	1359	1359	1624	1465	1132	1708	1017	1244	1373	1365	219
Pluie Na (mm)	1212	1210	1484	1527	980	1423	995	1152	1403	1265	204

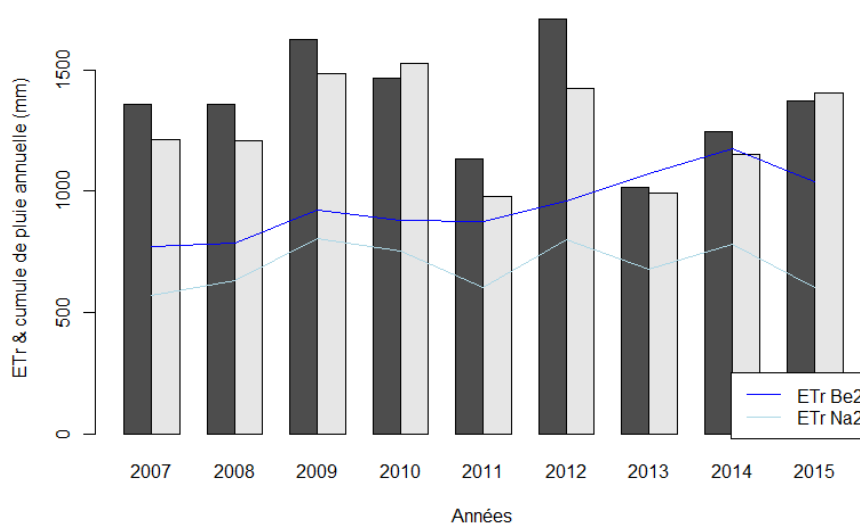


Figure 13 : Histogramme des pluies annuelles à Béléfoungou (noir) et Nalohou (gris). Les lignes bleu sombre et bleu clair représentent respectivement l'ETR à Béléfoungou et à Nalohou.

L'écart quasi-systématique entre les précipitations de Nalohou et Béléfoungou semble trop récurrent pour être explicable par la seule variabilité climatique (G. Panthou comm. Pers., 2017). Le gradient de précipitation dans cette région n'est pas non plus une explication suffisante. La différence de pluviométrie pourrait être expliquée par différents facteurs comme le couvert végétal ou la position topographique de la forêt. Les deux sites ont une pente semblable et il n'y a pas de relief marquant aux environs des deux sites, c'est donc la différence de couvert qui reste une hypothèse plausible mais non démontrée. Afin de nous affranchir de la différence de pluviométrie, nous avons comparé les évapotranspirations en pourcentage du cumul annuel de pluie (Tableau 5).

Tableau 5 : ETr en pourcentage du cumul annuel de précipitations des stations de Béléfoungou et Nalohou pour les années 2007 à 2015.

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	moyenne	Ecart type
ETr Be2 (%)	57	58	57	60	77	56	105	95	76	71	18
ETr Na2 (%)	47	52	54	49	62	56	68	68	43	56	9
Pluie Be (mm)	1359	1359	1624	1465	1132	1708	1017	1244	1373	1365	219
Pluie Na (mm)	1212	1210	1484	1527	980	1423	995	1152	1403	1265	204

L'évapotranspiration moyenne à Béléfoungou est de 71% contre 56% sur le site de Nalohou pour les années 2007 à 2015. On trouve une évapotranspiration supérieure à Béléfoungou de 15 % par rapport au site de Nalohou. Cet écart est proche des prévisions du modèle ParFlow (11%) pour les années 2007 à 2012. Les résultats publiés par [Mamadou, 2014] sur les mesures d'ETr par Eddy-covariance pour les années 2008 à 2010 montrent un écart d'environ 20 % ce qui confirme le fait que les forêts à *isoberlinia* évapotranspirent plus que les zones de culture/jachère.

3.5 Variabilité interannuelle de l'évapotranspiration

La Figure 13 met en évidence des variations annuelles significatives de l'évapotranspiration avec des variations de 403 mm à Béléfoungou et 233 mm à Nalohou pour les années 2007 à 2015. Cette variabilité peut avoir des causes multiples qui ne sont pas forcément les mêmes pour chaque site. Ce chapitre présente la sensibilité de l'évapotranspiration à différents paramètres ce qui permettra de mettre en évidence des différences de fonctionnement entre Nalohou et Béléfoungou.

3.5.1 Sensibilité de l'évapotranspiration au cumul de précipitations annuelles

Pour le jeu de données étudiées, les années de forte sécheresse présentent des maximums d'ETr (% pluie). La question de l'impact du cumul de précipitation sur l'ETr s'est donc rapidement imposée. La faible corrélation (Annexe V) entre le cumul de précipitation et l'ETr avec $r^2=0.066$ pour Béléfoungou et $r^2=0.231$ pour Nalohou peut s'expliquer par le fait que les précipitations sont très localisées dans l'année. Par conséquent elles ne représentent qu'une partie de la dynamique d'évapotranspiration qui a lieu durant l'ensemble de l'année. On notera tout de même que la corrélation est meilleure à Nalohou ce qui peut s'expliquer par la forte sensibilité des cultures au

régime de pluie. L'ETr en zones de forêt est donc à priori moins sensible aux variations de pluviométrie que les zones de culture.

3.5.2 Indice d'intensité hydroclimatique

Il a été démontré précédemment que le cumul de précipitations annuelles ne suffit pas à expliquer la variation interannuelle de l'ETr. [Giorgi et al., 2011] ont mis en place l'indice d'intensité hydroclimatique (HY_INT) définie par :

$$HY_INT = INT * DSL \quad \text{Equation 7}$$

Avec, HY_int l'indice d'intensité hydroclimatique ; INT la moyenne annuelle de l'intensité des précipitations (jours pluvieux uniquement) ; DSL la moyenne annuelle des périodes sèches (nombre de jours consécutifs sans pluie).

L'utilisation de cet indice permet une meilleure caractérisation du régime de pluviométrie puisqu'il prend en compte l'intensité pluvieuse mais aussi la longueur de période sèche entre les pluies. L'ETr étant dépendant du stock d'eau dans le sol mais aussi de l'énergie disponible, la prise en compte des périodes sèches devrait mieux expliquer les variations interannuelles de l'ETr.

La Figure 14 met en évidence une bonne corrélation entre HY_INT et l'ETr pour le site de Béléfoungou ($r^2 = 0.68$). Cette corrélation est bien plus faible sur le site de Nalohou ($r^2 = 0.001$). Cela signifie que l'ETr sur le site de Béléfoungou est sensible au régime de précipitation et notamment à l'énergie disponible pour alimenter les processus évapotranspiratifs. En revanche, dans le cas de Nalohou, ce terme ne permet pas d'expliquer la variation interannuelle de l'ETr ce qui signifie qu'un autre paramètre a plus de poids que HY_INT.

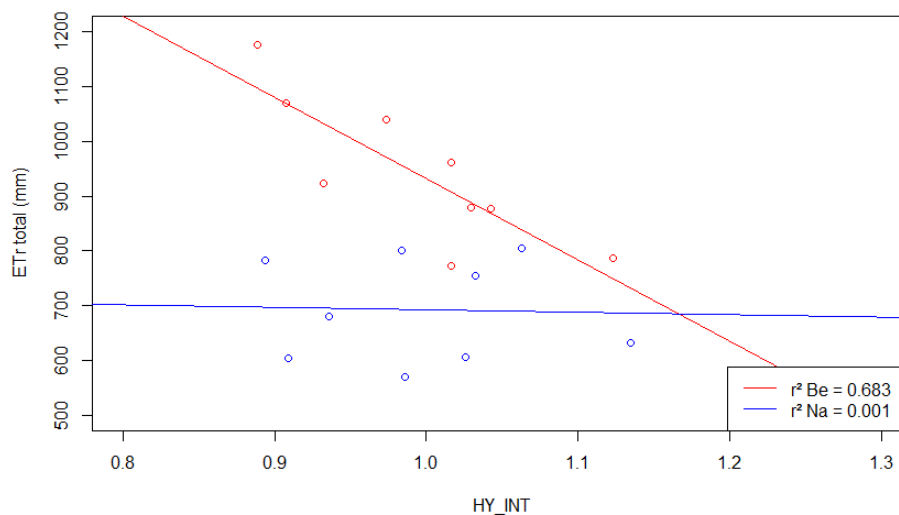


Figure 14 : Corrélation entre l'indice d'intensité hydroclimatique et l'ETr annuelle pour les années 2007 à 2015 sur les sites de Béléfoungou (en rouge) et Nalohou (en bleu).

3.5.3 Anomalie de stock d'eau dans le sol

Il a été démontré précédemment que le cumul de précipitations annuelles ainsi que HY_INT ne sont pas suffisant pour expliquer les variations interannuelles de l'évapotranspiration sur le site de Nalohou ($r^2_{\max} = 0.07$). Ce chapitre propose la mise en place d'un indice permettant de mieux comprendre les paramètres contrôlant l'évapotranspiration. Pour ce faire nous avons calculé une humidité des sols climatologique de 0 à 1m en faisant la moyenne de l'ensemble des années pour le site de Béléfoungou et Nalohou. Puis le signal a été lissé en appliquant une moyenne glissante de 21 valeurs. Cela étant fait, il est possible de comparer les valeurs de l'humidité des sols de chaque année avec la moyenne climatologique de sorte à mettre en évidence des anomalies positives ou négatives de stock d'eau. (Figure 15).

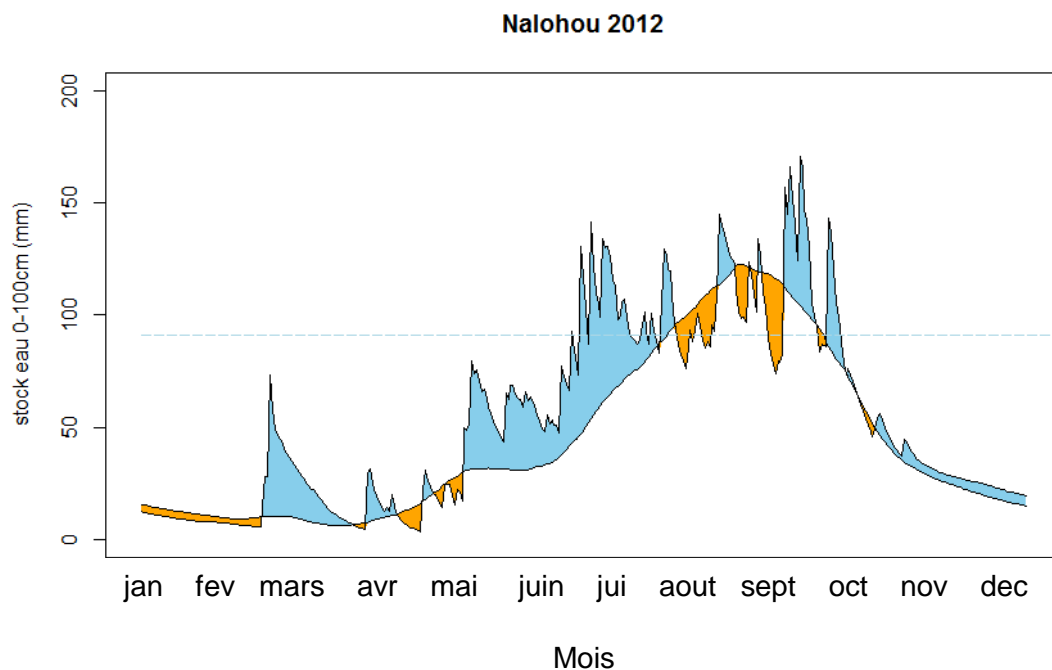


Figure 15 : Anomalie du stock d'eau du sol entre 0 et 1m pour l'année 2012 sur le site de Nalohou. En bleu les périodes où le stock d'eau est supérieur à la moyenne climatologique et en orange les période où le sol est plus sec que la moyenne climatologique.

De la même manière cette méthode a été appliquée au stock d'eau dans le sol de 0 à 30 cm. Les courbes d'anomalie de stock d'eau ont ensuite été écrêtées pour les valeurs supérieures au REW (RAW) pour le stock de 0 à 30 cm (1 mètre). Cela permet de ne pas prendre en compte l'eau stockée dans le sol au-delà d'une certaine valeur car le stock est jugé suffisant pour ne pas limiter l'évapotranspiration (Figure 10). L'Indice D'Anomalie (IDA) est défini comme étant la somme de l'écart à la moyenne après écrêtement. La moyenne climatologique du stock d'eau ayant elle aussi été limitée au REW (RAW). Les variations annuelles de l'IDA sont récapitulées en Annexe VI.

Les corrélations entre l'IDA et l'ETr annuelle sont récapitulées Figure 16. On peut constater que la corrélation pour la station de Nalohou est relativement bonne ($r^2 = 0.76$ en moyenne). En revanche,

la corrélation pour le site de Béléfoungou est faible ($r^2 = 0.13$ en moyenne). Cela peut s'expliquer par le fait que les arbres présentent un système de racines suffisamment développé pour que les variations de stock dans le sol superficiel (de 0 à 1 mètre) limitent peu leur transpiration. Les cultures pour leur part développent leur système racinaire jusqu'à une profondeur de l'ordre du mètre (S. Galle, comm. Pers., 2017). Il est donc normal que leur transpiration soit plus impactée par les variations du stock d'eau dans cette couche de sol.

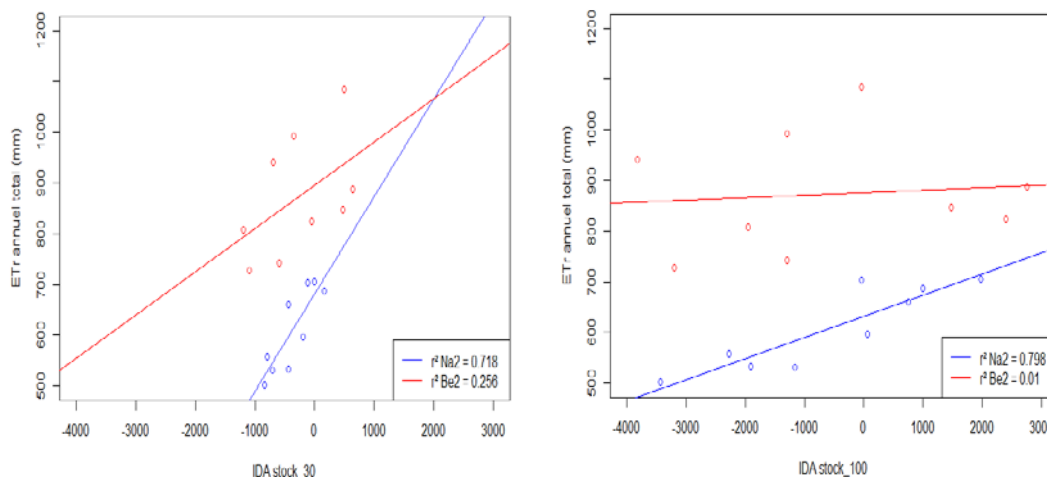


Figure 16 : Corrélation entre les anomalies de stock en eau pour une profondeur de 0 à 30cm et 0 à 1m sur les sites de Nalohou (bleu) et Béléfoungou (rouge). Années 2007 à 20015.

4 Conclusion et perspective

Cette étude a permis la mise en place d'un système efficace permettant de compléter les lacunes des jeux de données avec une bonne qualité. Cette méthode est rendue possible notamment par la forte densité d'instruments sur le bassin versant de la Donga. La faible distance entre les instruments ainsi qu'une topographie douce permettant d'obtenir une bonne corrélation entre les variables. L'utilisation d'une moyenne climatologique recalée en utilisant les valeurs encadrant la lacune s'est aussi démarquée comme étant une méthode plus fiable que les données de réanalyses MERRA dont la résolution n'est à priori pas adaptée à des variables telles que le vent.

Le fait d'avoir un jeu de données météorologiques continu sur neuf années consécutives a permis une modélisation de longue durée de l'évapotranspiration, unique en climat soudanien. Cela a permis la comparaison de l'impact d'années humides et sèches sur le flux de chaleur latente. Il a été mis en évidence la faible corrélation entre le cumul annuel de pluie et l'évapotranspiration. Le régime de précipitation représenté par l'indice d'intensité hydroclimatique semble être un meilleur indicateur pour la station de Béléfoungou ($r^2 = 0.68$). Dans le cas de Nalohou, l'indice d'anomalie du stock d'eau dans le sol est bon critère pour prédire si l'année présentera une forte ou faible évapotranspiration ($r^2_{moy} = 0.76$). En revanche pour Béléfoungou, la faible corrélation de

l'évapotranspiration avec l'indice d'anomalie du stock d'eau suppose que la relation précédente ne fonctionne que dans le cas de plantes dont les racines sont peu profondes (développement annuel).

L'écart moyen d'évapotranspiration entre la station de Béléfougou (forêt claire) et celle de Nalohou (mosaïque de cultures et jachères) est de 15% après correction de l'écart de pluviométrie. La différence de pluviométrie ne rend la différence entre les sites que plus importante en valeur absolue. Cette valeur basée sur une étude de longue durée vient soutenir les résultats obtenus par Eddy-covariance [Mamadou, 2014] qui étaient de 20% sur une période plus limitée, sans année sèche. Cette valeur diffère de 4% avec celle du modèle de référence ParFlow qui estime que l'évapotranspiration en zone de forêt est supérieure de 11% aux zones cultivées. Cet écart est satisfaisant compte tenu de la simplicité du modèle utilisé qui permet une simulation rapide de l'évapotranspiration. Il faut enfin remarquer que l'écart d'ETr entre les deux types de couvert a une variation interannuelle importante allant de 0% (2012) à 37% (2013) en 9 ans. Ces fortes variations viennent du fait que l'évapotranspiration n'est pas dirigée par les mêmes processus à Béléfougou et Nalohou. Les zones de cultures/jachères (type Nalohou) sont fortement sensibles aux variations de stock d'eau dans le sol de 0 à 30cm et 100cm (respectivement $r^2 = 0.72$ et $r^2 = 0.80$). En effet en Afrique de l'Ouest, le développement des cultures annuelles est fortement lié à la quantité d'eau disponible dans le sol à certaines périodes de l'année [Baron et al., 2003 ; Sultan et al., 2014]. D'un autre côté, les zones de forêt type Béléfougou qui puisent dans des nappes relativement profondes (15 m) seront plus influencées par la demande atmosphérique en vapeur d'eau.

Cette étude a mis en évidence une évapotranspiration supérieure de 15% sur le site de forêt claire de Béléfougou par rapport à la mosaïque de cultures et jachères de Nalohou. Un changement de l'utilisation des sols passant par un déboisement au profit de zones cultivées aura donc pour impact une réduction de l'évapotranspiration. Ce changement conduira vraisemblablement à une augmentation du niveau des nappes et donc à une plus forte disponibilité des ressources en eau.

Cependant certains paramètres sont susceptibles de moduler ce résultat et n'ont pas pu être étudiés en détail dans cette étude. Nous citerons par exemple la différence entre le régime de pluie de Béléfougou et Nalohou. Les précipitations au niveau de la forêt étant presque systématiquement supérieures à celle sur les zones déboisées (écart moyenne de 7% sur les années 2007 à 2015). Il serait intéressant de quantifier le rôle que joue la végétation sur le cumul de précipitation de sorte que ce phénomène puisse être pris en compte dans l'impact d'un déboisement. De plus un changement de l'utilisation des sols aura un impact sur le ruissellement qu'il sera nécessaire de quantifier si l'on veut estimer correctement l'impact du déboisement. Enfin, nous avons vu que les zones boisées et cultivées n'étaient pas sensibles aux mêmes paramètres. La tendance actuelle au Bénin étant une intensification du régime pluviométrique et à une augmentation de la température, il est possible que la demande évapotranspirative de l'atmosphère augmente. Les forêts étant plus sensibles à cette demande, cela pourrait amplifier l'écart d'évapotranspiration entre les forêts et les cultures.

5 Bibliographie

- [Allen et al., 2006] Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L., Howell, T. A., Ventura, F., Snyder, R., Itenfisu, D., Steduto, P., Berengena, J., Yrisarry, J. B., Smith, M., Pereira, L. S., Raes, D., Perrier, A., Alves, I., Walter, I. & Elliott, R. mar. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*. Vol. 81. No. 1-2, p. 1-22.
- [Aubinet et al., 2012] Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D. (Eds.), 2012. *Eddy Covariance. A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. Springer Netherlands, Dordrecht, 438p.
- [Awessou et al., 2016] Awessou, K.G.B., Peugeot, C., Rocheteau, A., Seguis, L., Do, F.C., Galle, S., Bellanger, M., Agbossou, E., Seghieri, J., 2016. Differences in transpiration between a forest and an agroforestry tree species in the Sudanian belt. *Agroforestry Systems* 1–11. doi:10.1007/s10457-016-9937-8
- [Barron et al., 2003] Barron, J., Rockström, J., Gichuki, F., Hatibu, N., 2003. Dry spell analysis and maize yields for two semi-arid locations in east Africa. *Agricultural and Forest Meteorology* 117, 23–37. doi:10.1016/S0168-1923(03)00037-6
- [CSAO, 2012] CSAO, 2012. *Compte rendu du forum du club du sahel et de l'Afrique de l'Ouest, Peuplement, marché et sécurité alimentaire, Ouagadougou, 4 - 8 décembre 2012*, Available on. *Rapp. tech.*, p. 16. url : <http://www.oecd.org/fr/csao/publications/FR-Compte%20rendu%20forum.pdf>.
- [Flaounas et al., 2012] Flaounas, E., Janicot, S., Bastin, S., Roca, R., Mohino, E., 2012. The role of the Indian monsoon onset in the West African monsoon onset: observations and AGCM nudged simulations. 38: 965. doi:10.1007/s00382-011-1045-x
- [Getirana et al., in press] Getirana A., A.Boone, C.Peugeot, and the ALMIP2 team, in press. Streamflows over a West African Basin from the ALMIP2 Model Ensemble. *Journal of Hydrometeorology* (in press).
- [GIEC, 2013] Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.) IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- [Gupta et al., 2009] Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., Martinez, G. F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. Vol. 377, 80–91
- [Guyot, 2010] Guyot, A., 2010. *Estimation de l'évapotranspiration sur un couvert complexe par utilisation de la scintillométrie infrarouge : Application à un bassin versant de zone soudano-sahélienne (Bénin)*. Thèse de doct. Université de Grenoble, France, pp 243.
- [Heldmann et al., 2009] Heldmann, M., Doevenspeck, M. & Menz, G., 2009. *Démographie : Disparités spatiales et taux de croissance élevés. IMPETUS Atlas du Bénin. Résultats de recherche 2000-2007*. *Rapp. tech.* No. Troisième édition. Département de Géographie, Université de Bonn, Allemagne : Département de Géographie, Université de Bonn, Allemagne. Sous la dir. de Judex, M., Thamm, H.-P., Röhrig, J. et Schulz, O., 103-104.
- [Huntington, 2006] Huntington, T G, 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.003
- [Jabot-Robert, 2012] Jabot-Robert, D., 2012. *Caractérisation et modélisation de la dynamique de l'évapotranspiration en Afrique Soudanienne en zone de socle : interaction entre les aquifères et la végétation*. Thèse de doct. Université de Grenoble.
- [Kabat et al., 1997] Kabat, P., Dolman, A. J. & Elbers, J. A., 1997. Evaporation, sensible heat and canopy conductance of fallow savannah and patterned woodland in the Sahel. *Journal of Hydrology*. Vol. 188, 494-515.

- [Lawin, 2007]** Lawin, A. 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 doct. Institut National Polytechnique de Grenoble et d'Abomey-Calavi, pp 231.
- [Le Barbé et al., 2002]** Le Barbé, L., Lebel, T. & Tapsoba, D., 2002. Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990. *Journal of Climate*. Vol. 15. No. 2, 187-202.
- [Le Lay et Galle, 2005]** Le Lay, M. & Galle, S., 2005. How changing rainfall regimes may affect the water balance : a modelling approach in West Africa. IAHS-AISH publication 296.
- [Le Lay, 2006]** 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 doct. Institut National Polytechnique de Grenoble, p. 264.
- [Le Lay et al., 2008]** Le Lay, M., Saulnier, G.-M., Galle, S., Seguis, L., Metadier, M. & Peugeot, C., 2008. Model representation of the sudanian hydrological processes : Application on the donga catchment (Benin). *Journal of Hydrology*. Vol. 363. No. 1-4, 32-41.
- [Lebel et al., 2003]** Lebel, T., Diedhiou, A. & Laurent, H., 2003. Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 108, p. D8.
- [Lebel, T., et al., 2009]** Lebel, T., et al., 2009. AMMA-CATCH studies in the Sahelian region of West Africa: An overview. *J. Hydro.*, 375, 3-13.
- [Leroux, 2012]** Leroux, L., 2012. Analyse diachronique de la dynamique paysagère sur le bassin supérieur de l'Ouémé (Bénin) à partir de l'imagerie Landsat et MODIS - Cas d'étude du communal de Djougou. Rapp. tech.
- [Mamadou, 2014]** Mamadou, O., 2014. Etude des flux d'évapotranspiration en climat Soudanien : comportement compare de deux couverts végétaux au Bénin. Thèse de doct. Université de Grenoble.
- [Mamadou et al., 2014]** Mamadou, O., Cohard, J. M., Galle, S., Awanou, C. N., Diedhiou, A., Kounouhewa, B. & Peugeot, C., 2014. Energy fluxes and surface characteristics over a cultivated area in Benin : daily and seasonal dynamics. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 18. No. 1-22. doi : 10.5194/hess-18-1-2014.
- [Maxwell et Miller, 2005]** Maxwell, R. M., and N. L. Miller (2005), Development of a coupled land surface and groundwater model, *J. Hydrometeorol.*, 6 (3), 233–247, doi:10.1175/JHM422.1.
- [Mutziger et al., 2005]** Mutziger, A.L., Burt, C.M., Howes, D.J. & Allen, R.G., 2005. Comparison of Measured and FAO-56 Modeled Evaporation from Bare Soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* Volume 131 Issue 1.
- [Ntivunwa, 2015]** Ntivunwa, J. D., 2015. Bilan hydrique annuel de deux types d'occupation de sol au Bénin : gapfilling des données météorologiques et d'évapotranspiration. Rapport de stage Master 2 LTHE-IRD
- [Panthou, 2013]** Panthou, G., 2013. Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années. Thèse de doct. Université de Grenoble.
- [Panthou et al., 2014]** Panthou G., Vischel T. & Lebel T., 2014. Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, 34 : 3998-4006.
- [Paturel et al., 1997]** Paturel, J.E., Servat, E., Kouamé, B., Lubès, H., Ouedraogo, M. & Masson, J., (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part 2: An integrated regional approach. *J. Hydrol.* 191, 1–15.
- [Peugeot et al., 2011]** Peugeot, C., Guichard, F., Bock, O., Bouniol, D., Chong, M., Boone, A., Cappelaere, B., Gosset, M., Besson, L., Lemaître, Y., Séguis, L., Zannou, A., Galle, S. & Redelsperger, J.-L., jan. 2011. Mesoscale water cycle within the West African Monsoon. *Atmospheric Science Letters*. Vol. 12. No. 1, p. 45-50.
- [Ramier et al., 2009]** Ramier, D., Boulain, N., Cappelaere, B., Timouk, F., Rabanit, M., Lloyd, C. R., Boubkraoui, S., Métayer, F., Descroix, L. & Wawrzyniak, V., 2009. Towards an understanding of coupled physical and biological processes in the cultivated Sahel-1. Energy and water. *Journal of Hydrology*. Vol. 375. No. 1-2, 204-216.

- [Redelsperger et Lebel, 2009]** Redelsperger, J., Lebel, T., 2009. Surface processes and water cycle in West Africa, studied from the AMMA-CATCH observing system. *Journal of Hydrology* 375, 1–2. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.017
- [Robert, 2012]** J.-Robert, D., 2012. Caractérisation et modélisation de la dynamique de l'évapotranspiration en Afrique Soudanienne en zone de socle : interaction entre les aquifères et la végétation. Thèse de doct. Université de Grenoble.
- [Richard et al., 2013]** Richard, A., Galle, S., Descloitres, M., Cohard, J.-M., Vandervaere, J.-P., Séguis, L. and Peugeot, C., 2013. Interplay of riparian forest and groundwater in the hillslope hydrology of Sudanian West Africa (northern Benin). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 5079-5096.
- [Servat et al., 1999]** Servat, E., Paturel, J.E., Lubès-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J., Travaglio, M. & Marieu, B., 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *Rev. Sci. Eau* 12(2), 363–387.
- [Sultan et al., 2013]** Sultan, B., Roudier, P., Quirion, P., Alhassane, A., Muller, B., Dingkuhn, M., Ciais, P., Guimberteau, M., Traore, S., Baron, C., 2013. Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environmental Research Letters* 8, 014040. doi:10.1088/1748-9326/8/1/014040
- [Weiss et al., 2004]** Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., Jonckheere, I., Coppin, P., 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. *Agric. For. Meteorol.* 121, 37–53. doi:10.1016/j.agrformet.2003.08.001
- [White, 1986]** White, F., 1986. La végétation de l'Afrique: Mémoire accompagnant la carte de végétation de l'Afrique Unesco-AETFAT-UNSO, Recherches sur les ressources naturelles. ORSTOM: Unesco, Paris. p51-52.

6 Annexe

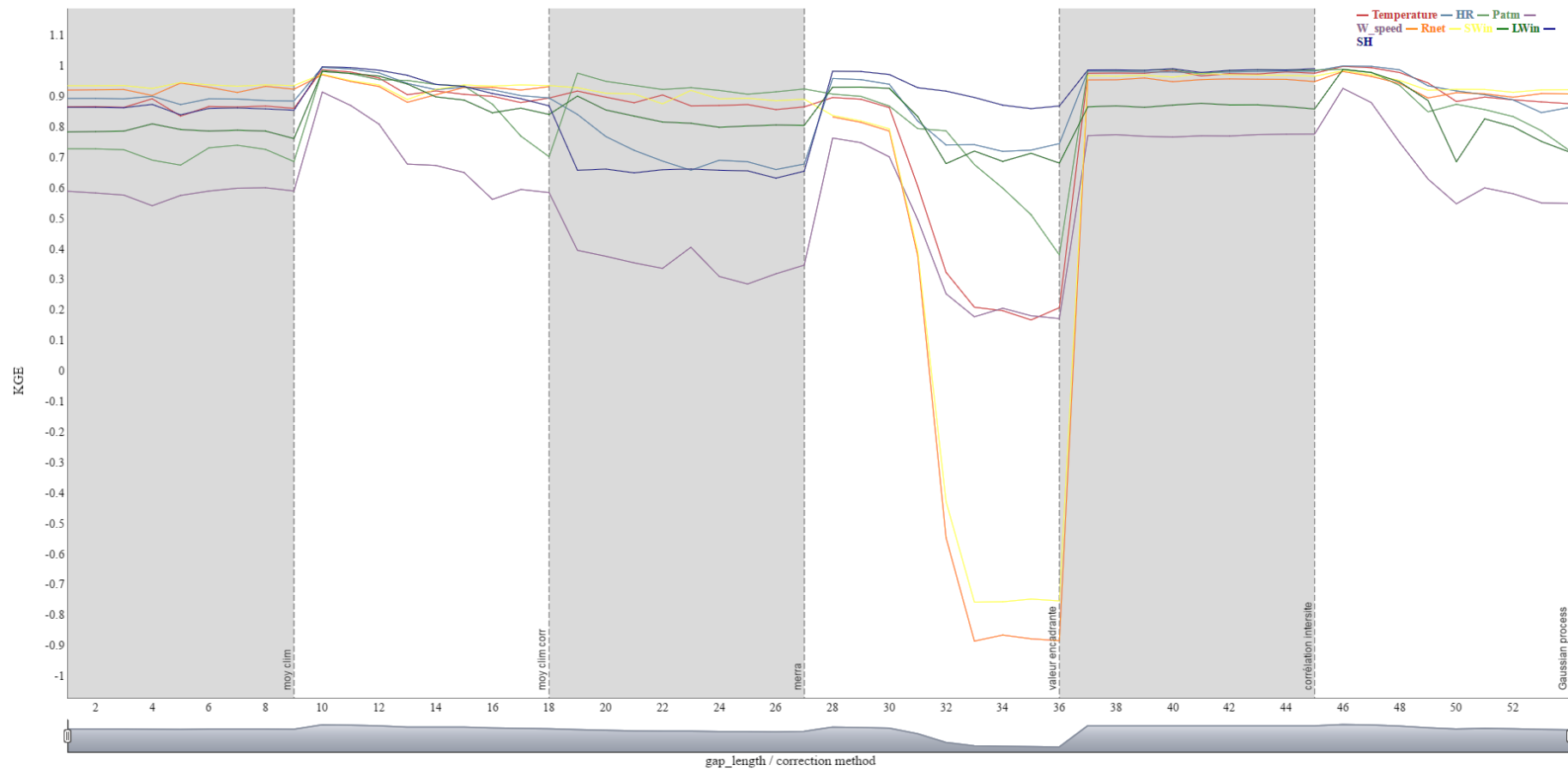
Annexe I : Instrumentation installée à Nalohou (cultures et jachères et Béléfoungou (forêt claire) ..	2
Annexe II : Performances de différentes méthodes de gap filling	3
Annexe III : Erreur standard associée au gap filling	4
Annexe IV : Quantification du nombre de lacune	7
Annexe V : Corrélation entre le cumul de précipitation et l'évapotranspiration annuelle	10
Annexe VI : Anomalies de Kc et de stock Hydrique.....	11

Annexe I : Instrumentation installée à Nalohou (cultures et jachères et Béléfoungou (forêt claire)

Instrument	Sampling rate	Nalohou Sensor and maufacturers	Height (m)	Bellefoungou Sensor and maufacturers	Height (m)
3D sonic anemometer	20 Hz	CSAT3 Campbell Sci., USA	5	CSAT3 Campbell Sci., USA	18
Gas analyzer	20 Hz	LI-7500, Li-COR Bioscience, USA	5	LI-7500, Li-COR Bioscience, USA	18
Thermometer Hygrometer 2D anemometer	10 sec.	WXT510, Vaisala, Finland	2	WXT510, Vaisala, Finland	5
Pyranometer	10 sec.	CNR1, Kipp and Zonen, NL	2	SKS1110, Skye, NL	5
Net radiometer	10 sec.	CNR1, Kipp and Zonen, NL	2	NR-Lite, Kipp and Zonen, NL	5
Raingauge	pulse	Tipping bucket ABS3030, Précis Mécanique, France	1.2	Tipping bucket ABS3030, Précis Mécanique, France	1.2
Soil thermometer	10 sec.	Thermocouple 105, Campbell Sci., USA	-0.5, -0.1, -0.2, -0.4, -0.6, -1.0	Thermocouple 105, Campbell Sci., USA	-0.5, -0.1, -0.2, -0.4, -0.6, -1.0
Water content probe	10 sec.	CS616, Campbell Sci., USA	-0.5, -0.1, -0.2, -0.4, -0.6, -1.0	CS616, Campbell Sci., USA	-0.5, -0.1, -0.2, -0.4, -0.6, -1.0
Data logger		CR3000, Campbell Sci, USA		CR3000, Campbell Sci, USA	

Annexe II : Performances de différentes méthodes de gap filling

KGE calculé entre les valeurs gap fillées et les mesures pour l'ensemble des variables (température, humidité relative, pression atmosphérique, vitesse du vent, rayonnement net, rayonnement incident courte et grande longueur d'onde) avec différente méthode de gap filling (moyenne climatologique, moyenne climatologique corrigée, utilisation de donnée MERRA, moyenne des valeurs encadrantes, corrélation intersites et processus gaussien).



Annexe III : Erreur standard associée au gap filling

Station de Béléfoungou

Be - temp	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	1.53	NA	NA	1.46	3.62	0.75	1.69	4.32	0.11
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap22	0.83	0.95	NA	1.32	0.86	0.10	0.64	1.99	1.60
gap23	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Be - HR	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	NA	NA	NA	4.86	21.69	2.89	13.22	19.36	17.03
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap22	NA	NA	NA	NA	NA	5.84	NA	NA	NA
gap23	4.67	0.79	NA	2.20	1.48	NA	6.21	8.17	NA
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	8.19
gap3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Be - Patm	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	3.21	NA	NA	0.96	0.88	0.78	1.62	NA	4.76
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap22	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap23	0.62	1.62	NA	1.22	0.60	0.33	0.15	0.86	1.64
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3.30	7.35

Be - V_vent	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	NA	NA	NA	0.93	0.08	0.05	0.14	3.36	0.11
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap22	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap23	0.02	0.23	NA	0.03	0.03	NA	0.16	1.06	0.14
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	0.14	NA	NA	NA
gap3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.01

Be - Rnet	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	8.30	NA	NA	41.79	17.29	11.20	83.77	45.01	193.96
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap22	15.73	64.81	40.61	5.40	6.89	29.30	NA	94.29	43.98
gap23	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap3	NA	NA	NA	NA	55.42	91.53	185.53	NA	NA

Be - Swin	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	15.48	NA	NA	27.00	11.16	40.61	51.76	8.44	250.04
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap22	13.12	68.75	44.21	4.07	20.58	9.92	NA	96.18	18.60
gap23	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap3	121.19	NA	NA	121.19	55.60	137.39	274.12	NA	NA

Be - Lwin	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	NA	NA	NA	NA	NA	6.13	5.58	19.92	4.24
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap22	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap23	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap24	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	6.94	NA	8.20	15.14
gap3	2.85	5.22	2.85	2.85	2.85	1.06	6.44	NA	23.55

Station de Nalohou

Na - temp	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	NA	NA	NA	2.00	NA	2.59	0.48	3.90	0.90
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap22	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap23	3.85	NA	NA	1.47	0.04	0.28	0.07	NA	0.89
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Na - HR	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	NA	NA	NA	2.97	NA	8.14	4.67	12.68	20.30
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap22	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap23	13.97	NA	NA	17.19	6.75	9.01	35.98	NA	7.19
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Na - Patm	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	NA	NA	NA	1.13	NA	2.76	2.97	1.72	4.12
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap22	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.20	NA	NA
gap23	1.87	NA	NA	0.80	1.62	0.10	NA	NA	1.01
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	7.08

Na - V_vent	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	NA	NA	NA	NA	NA	0.22	0.93	0.17	0.54
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap22	0.07	NA	NA	0.40	0.01	0.07	0.27	NA	NA
gap23	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.15
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap3	NA	NA	NA	0.53	NA	NA	NA	NA	0.64

Na - Rnet	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	NA	NA	NA	NA	NA	6.87	1.22	23.00	112.16
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	16.98	NA	20.40
gap22	268.66	NA	NA	0.83	9.69	0.46	NA	NA	NA
gap23	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap3	NA	NA	NA	NA	9.30	164.28	135.40	NA	NA

Na - Swin	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	NA	NA	NA	NA	NA	0.79	1.16	0.59	117.46
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	63.55	NA	18.18
gap22	308.23	NA	NA	3.60	NA	4.94	NA	NA	NA
gap23	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap3	NA	NA	NA	1.13	3.64	116.81	269.94	NA	NA

Na - LWin	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gap1	NA	NA	NA	NA	NA	11.00	4.03	11.28	9.27
gap21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5.79
gap22	NA	NA	NA	NA	NA	11.84	33.44	NA	NA
gap23	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
gap3	11.50	NA	NA	8.67	22.47	0.66	35.26	NA	11.03

Annexe IV : Quantification du nombre de lacune

Station de Béléfoungou

Béléfoungou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
Temp. Atm.	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	13047	111	0	3041	5894	8604	10492	6276	1489	12736	-
Gap1	1	0	0	7	6	6	17	1	3	14	0.1
Gap2 (Bira)	13046	111	0	3034	5888	8598	10475	6275	1486	0	0
Gap2 (Djougou)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	343	2.7
Gap2 (Nalohou)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12389	97
Gap3	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	0.1

Béléfoungou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
HR	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	13047	111	0	3041	5894	8604	10492	6276	1489	48954	-
Gap1	0	0	0	7	6	6	16	1	3	39	0
Gap2 (Bira)	0	0	0	0	0	8598	0	0	0	8598	17.6
Gap2 (Djougou)	13047	111	0	3034	5888	0	10471	6275	0	38826	79.3
Gap2 (Nalohou)	0	0	0	0	0	0	0	0	1486	1486	3.0
Gap3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Béléfoungou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
Pression atm.	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	13047	111	0	3041	5894	8604	17520	17520	17520	83257	-
Gap1	22	0	0	15	6	11	3	0	4	61	0.1
Gap2 (Bira)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap2 (Djougou)	13025	111	0	3026	5888	8593	17517	17519	17505	83184	99.9
Gap2 (Nalohou)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap3	0	0	0	0	0	0	0	1	11	12	0.0

Béléfoungou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
Vitesse vent	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	13047	111	0	3041	5894	8624	17520	1547	17520	67304	-
Gap1	0	0	0	7	6	11	3	1	795	823	1.2
Gap2 (Bira)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap2 (Djougou)	13047	111	0	3034	5888	0	17517	1546	16263	57406	85.3
Gap2 (Nalohou)	0	0	0	0	0	8613	0	0	0	8613	12.8
Gap3	0	0	0	0	0	0	0	0	462	462	0.7

Béléfoungou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
Rnet	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%

Lacunes totales	13047	111	142	3041	6078	5734	42	68	1489	29752	-
Gap1	24	0	0	7	23	77	3	1	6	141	0.5
Gap2 (Bira)	13023	111	142	3034	5904	5462	0	67	1483	29226	98.2
Gap2 (Djougou)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap2 (Nalohou)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap3	0	0	0	0	151	195	39	0	0	385	1.3

Béléfougou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
SW in	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	13047	111	142	3041	6078	5765	42	68	1489	29783	-
Gap1	98	0	0	16	22	62	3	1	6	208	0.7
Gap2 (Bira)	12918	111	142	2994	5824	5568	0	67	1483	29107	97.7
Gap2 (Djougou)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap2 (Nalohou)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap3	31	0	0	31	232	135	39	0	0	468	1.6

Béléfougou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
LW in	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	17520	17568	17520	17520	17520	5766	42	68	1489	95013	-
Gap1	0	0	0	0	0	4	3	1	3	11	0.0
Gap2 (Bira)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap2 (Djougou)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap2 (Nalohou)	17288	17289	17288	17288	17288	5608	0	67	1415	93531	98.4
Gap3	232	279	232	232	232	154	39	0	71	1471	1.5

Station de Nalohou

Nalohou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
Temp. Atm.	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	21	0	0	1049	134	5030	343	1	6178	12756	-
Gap1	0	0	0	2	0	3	1	1	4	11	0.1
Gap2 (Bélé)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap2 (Bira)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap2 (Djougou)	21	0	0	1047	134	5027	342	0	6174	12745	99.9
Gap3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nalohou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
HR	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	21	0	0	1049	134	5030	343	1	6178	12756	-
Gap1	0	0	0	2	0	3	1	1	4	11	0.1
Gap2 (Bélé)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Gap2 (Bira)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap2 (Djougou)	21	0	0	1047	134	5027	342	0	6174	12745	99.9
Gap3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nalohou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
Pression Atm.	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	21	0	0	1049	134	5030	344	1	6178	12757	-
Gap1	0	0	0	2	0	6	1	1	4	14	0.1
Gap2 (Bélé)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap2 (Bira)	0	0	0	0	0	0	343	0	0	343	2.7
Gap2 (Djougou)	21	0	0	1047	134	5024	0	0	6163	12389	97.1
Gap3	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11	0.1

Nalohou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
Vitesse vent	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	21	0	0	1047	134	5030	343	1	6192	12768	-
Gap1	0	0	0	0	0	3	1	1	276	281	2.2
Gap2 (Bélé)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap2 (Bira)	21	0	0	1038	134	5027	342	0	0	6562	51.4
Gap2 (Djougou)	0	0	0	0	0	0	0	0	5454	5454	42.7
Gap3	0	0	0	9	0	0	0	0	462	471	3.7

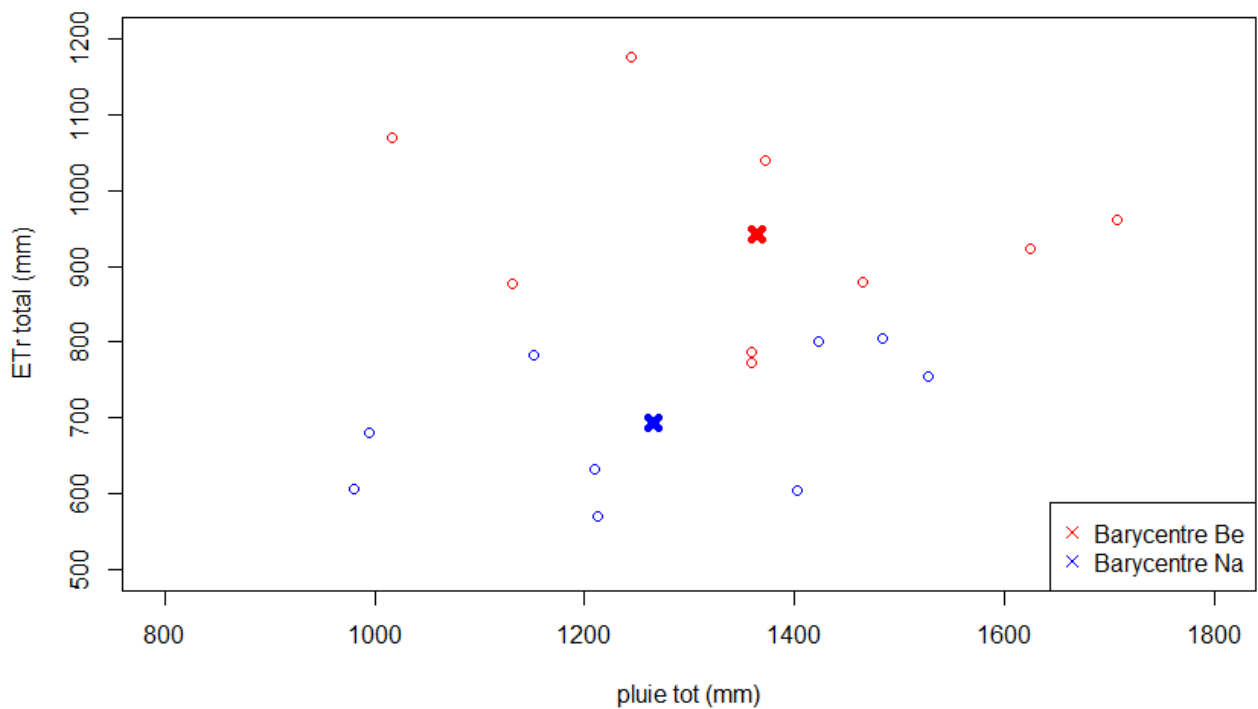
Nalohou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
Rnet	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	21	0	0	1047	232	5175	341	1	4538	11355	-
Gap1	0	0	0	0	0	1	3	1	2	7	0.1
Gap2 (Bélé)	0	0	0	0	0	0	299	0	4536	4835	42.6
Gap2 (Bira)	21	0	0	1047	81	4979	0	0	0	6128	54.0
Gap2 (Djougou)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap3	0	0	0	0	151	195	39	0	0	385	3.4

Nalohou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
SW in	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	21	0	0	1047	232	5175	339	1	4538	11353	-
Gap1	0	0	0	0	0	1	1	1	2	5	0.0
Gap2 (Bélé)	0	0	0	0	0	0	299	0	4536	4835	42.6
Gap2 (Bira)	21	0	0	1038	0	5039	0	0	0	6098	53.7
Gap2 (Djougou)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap3	0	0	0	9	232	235	39	0	0	515	4.5

Nalohou	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total	
LW in	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	%
Lacunes totales	21	0	0	1047	232	5175	339	1	4538	11353	-
Gap1	0	0	0	0	0	1	1	1	2	5	0.0
Gap2 (Bélé)	0	0	0	0	0	0	0	0	4465	4465	39.3
Gap2 (Bira)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap2 (Djougou)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gap3	21	0	0	1047	232	154	39	0	71	1564	13.8

Annexe V : Corrélation entre le cumul de précipitation et l'évapotranspiration annuelle

Corrélation entre le cumule de pluie annuel et l'ETr pour le site de Béléfougou (rouge) et Nalohou (bleu) pour les années 2007 à 2015.



Annexe VI : Anomalies de Kc et de stock Hydrique

Station de Nalohou

