

SAISONNALITE DES FLUX D'ENERGIE D'UNE ZONE CULTIVEE EN CLIMAT SOUDANIEN (BENIN, AFRIQUE DE L'OUEST)

MAMADOU O.^{1,2}, GALLE S.¹, COHARD J.-M.¹, SEGHIERI J.³, PEUGEOT C.³, KOUNOUHEWA B.² et AWANOU C. N.².

¹Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), Grenoble (France) : ossenatou.mamadou@ujf-grenoble.fr ; sylvie.galle@ird.fr ; jean-martial.cohard@ujf-grenoble.fr

²Laboratoire de Physique du Rayonnement (LPR), Université d'Abomey-Calavi (Bénin) : ossenath@yahoo.fr ; kbbasile@gmail.com ; cawanou@yahoo.fr

³HydroSciences Montpellier (HSM), Université de Montpellier 2 (France) : josiane.seghieri@ird.fr ; christophe.peugeot@ird.fr.

Résumé: En Afrique de l'Ouest, les échanges d'énergie entre la surface et l'atmosphère jouent un rôle crucial dans la boucle de rétroaction entre humidité du sol et précipitations. Toutefois, ces échanges sont encore mal documentés dans cette région. L'objectif de cette étude est d'analyser la saisonnalité des flux d'énergie d'une zone cultivée située au Nord du Bénin (Nalohou, latitude 9,74°N ; longitude 1,60°E). Les flux d'énergie ont été mesurés sur un cycle annuel en utilisant la méthode d'Eddy Covariance. L'étude se focalise sur les variations saisonnières de la part de l'énergie disponible dissipée en évapotranspiration (fraction évaporative EF). Les résultats montrent qu'en saison des pluies, 75% du rayonnement net se dissipe en évapotranspiration. En saison sèche, ce taux diminue fortement mais demeure non nul (~ 20%), ce qui peut paraître surprenant pour des conditions de surface sèches. L'évapotranspiration observée en saison sèche est liée à la transpiration des arbustes situés à proximité du site étudié qui ont accès à un horizon de sol plus humide sous la surface. A l'échelle annuelle, l'humidité du sol demeure le principal facteur expliquant la variabilité de (EF). Pendant la saison humide, la variabilité de (EF) est aussi expliquée par la croissance de la végétation.

Mots-clés: flux d'énergie, évapotranspiration, eddy covariance, climat soudanien, Bénin.

Abstract: Seasonality of surface energy fluxes over an agricultural site in sudanian climate (Benin, west Africa). In West Africa, soil/atmosphere energy transfers are key factors in the feedback loop between soil moisture and precipitations. However, very few observations exist for these energy fluxes in this region. The study focuses on seasonal variations of the surface energy fluxes over an agricultural area in the northern part of Benin. The Eddy Covariance method has been used to measure the energy fluxes along an entire annual cycle. Results show that evapotranspiration of the studied area is not null during the dry season (20% of net radiation), although the soil is almost bare and dry. This non negligible amount of evapotranspiration is due to the transpiration of sparse shrubs and trees located nearby which uptake water from wet underground layers. During the wet conditions, (EF) accounts for 75% of net radiation. Soil moisture remains the main driving factor for seasonal variability. During the wet season, (EF) variations are also driven by the herbaceous vegetation growth.

Keywords: energy fluxes, evapotranspiration, eddy covariance, sudanian climate, Benin.

Introduction

En Afrique de l'Ouest, les échanges de chaleur – le flux de chaleur sensible (H) – et d'humidité – le flux chaleur latente (LE) – entre la surface et l'atmosphère jouent un rôle crucial dans la boucle de rétroaction entre humidité du sol et précipitations (Charney 1975 ; Koster *et al.*, 2004). En particulier, ils permettent le déclenchement de la convection et apportent une partie de l'eau pour la formation des nuages et par conséquent des précipitations. A l'échelle régionale, Eltahir (1998) a identifié que la baisse conjointe de l'albédo de surface et du rapport de Bowen (H/LE) déclenchent une chaîne de rétroaction positive entre humidité du sol et précipitations. A méso-échelle, la distribution spatiale de l'humidité des sols et donc du rapport de Bowen positionne les systèmes convectifs (Taylor *et al.*, 2012). Au-delà de l'identification des processus, la quantification des échanges sol / atmosphère et de leurs variabilités temporelle et spatiale est incontournable pour mieux comprendre ces boucles de rétroaction et leur rôle de régulation dans le système climatique ouest-africain. Malgré leur importance, encore très peu de mesures de flux ont été effectuées en Afrique de l'Ouest. En particulier, Bagayoko *et al.* (2007) ont montré que, pour une zone de culture au Burkina-Faso, la disponibilité en eau du sol est le principal facteur limitant le flux de chaleur latente. L'objectif de cette étude, est d'analyser la saisonnalité des flux d'énergie d'une zone cultivée en climat soudanien. La zone d'étude est localisée dans la

commune du village de Nalohou, dans le département de la Donga au Nord-Bénin. Dans cette région, les saisons sont nettement marquées, conduisant à une importante variabilité saisonnière de la répartition des flux d'énergie. Le cycle annuel de la fraction évaporative est analysé. Elle représente la part de l'énergie disponible dissipée en évapotranspiration. L'étude vise à montrer comment en plus de l'humidité du sol, les autres caractéristiques de la surface et les facteurs climatiques influencent et expliquent la variabilité saisonnière de la fraction évaporative.

1. Matériels et Méthodes

1.1. Description du site et contexte climatique

Le site AMMA-CATCH (www.amma-catch.org) de Nalohou (latitude 9,74°N, longitude 1,60°E, altitude 449 m) situé à ~10 km de Djougou (Bénin), est soumis à un climat de type soudanien, avec une pluviosité moyenne annuelle de 1190 mm de 1950 - 2002 (Lelay *et al.*, 2005). Ce climat se caractérise par l'alternance d'une saison des pluies de cinq mois d'avril à octobre et d'une courte saison sèche, de décembre à janvier, séparées par deux phases de transition qui peuvent durer plusieurs mois (figure 1a). Cette alternance est causée par le déplacement de la Zone de Convergence Inter Tropicale dont la position relative par rapport au site apporte de l'humidité par le flux de mousson ou de l'air sec par les vents d'Harmattan. L'humidité absolue (q_a) permet de définir la saison sèche ($q_a < 6 \text{ g.m}^{-3}$) et la saison humide ($q_a > 16 \text{ g.m}^{-3}$) (Lothon *et al.*, 2008). Cette alternance est illustrée pour l'année 2009 sur la figure 1. La station micro-météorologique a été installée dans une zone cultivée, constituée d'une mosaïque de culture et de jachère. Ce couvert représente une part croissante de la superficie de la commune de Djougou (3900 km²) : 7% en 1973 et 18% en 2000 (Leroux, 2012). Le développement du couvert végétal suit le cycle saisonnier des précipitations (figure 1d). Ainsi, les herbacées annuelles se développent dès les premières pluies en mars - avril. L'indice foliaire de la végétation (LAI) atteint 2.5 m².m⁻² à la fin du mois d'octobre. Les herbacées sont brûlées lorsqu'elles sont sèches entre novembre et février. La rugosité aérodynamique (z_0) du site suit la croissance de la végétation et peut être caractérisée par une loi linéaire en fonction de la hauteur des herbacées ($z_0 = 0.17 + 0.09 h_{veg}$). Elle varie entre 0.17 m et 0.46 m (Cohard et Galle, 2012, *communication personnelle*).

1.2. Acquisition et traitement des données

L'instrumentation comprend un anémomètre 3D (CSAT 3D, *Campbell Scientific Sci.*) et un analyseur de gaz (Licor-7500, *Biosciences Inc.*) situé à 4.95 m au-dessus de la surface du sol. Ils mesurent à haute fréquence (20 Hz) la vitesse du vent dans les trois directions de l'espace (u , v , w) la température de l'air et la concentration de vapeur d'eau (q). Les flux de chaleur sensible (H) et de chaleur latente (LE) sont calculés (Eqs. 1 et 2) comme la covariance entre la fluctuation de la vitesse du vent dans la direction verticale w' [m.s^{-1}] et la fluctuation de la température T' [K] pour la chaleur sensible et la fluctuation de l'humidité absolue de l'air q' [g.m^{-3}] pour la chaleur latente. Dans les équations (1) et (2), ρ [kg.m^{-3}] est la densité de l'air; C_p [$\text{J.kg}^{-1}.K^{-1}$], la chaleur spécifique à pression constante de l'air humide et λ [J.g^{-1}], la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

$$H = \rho C_p \overline{w'T'} \quad [W.m^{-2}] \quad (1)$$

$$LE = \lambda \overline{w'q'} \quad [W.m^{-2}] \quad (2)$$

Les données de flux sont traitées avec le logiciel EdiRe¹ en suivant le protocole défini par CarboEurope (Aubinet *et al.*, 1999). Une méthodologie propre au contexte climatique du

¹ Logiciel libre développé par School of Geosciences de l'Université de Edinburgh

Nord-Bénin a été développée (Mamadou *et al.*, 2012) pour pallier les problèmes de dérive de l'analyseur de gaz rencontrés sur le site étudié. La station comprend également la mesure à la demi-heure, des quatre composantes du bilan radiatif permettant le calcul du rayonnement net (Rn), la température (T_{air}) et l'humidité relative de l'air mais aussi la mesure des températures (T_{sol}) et de l'humidité du sol (H_{sol}) pour estimer le flux de chaleur par conduction (G) avec la méthode des harmoniques (Horton *et al.*, 1983). Tous les termes du bilan d'énergie (Eq. 3) sont ainsi estimés. La fraction évaporative (Eq. 4) est définie comme le rapport entre l'évapotranspiration réelle (LE) et l'énergie disponible ($Rn-G$).

$$Rn = G + H + LE \quad [W.m^{-2}] \quad (3)$$

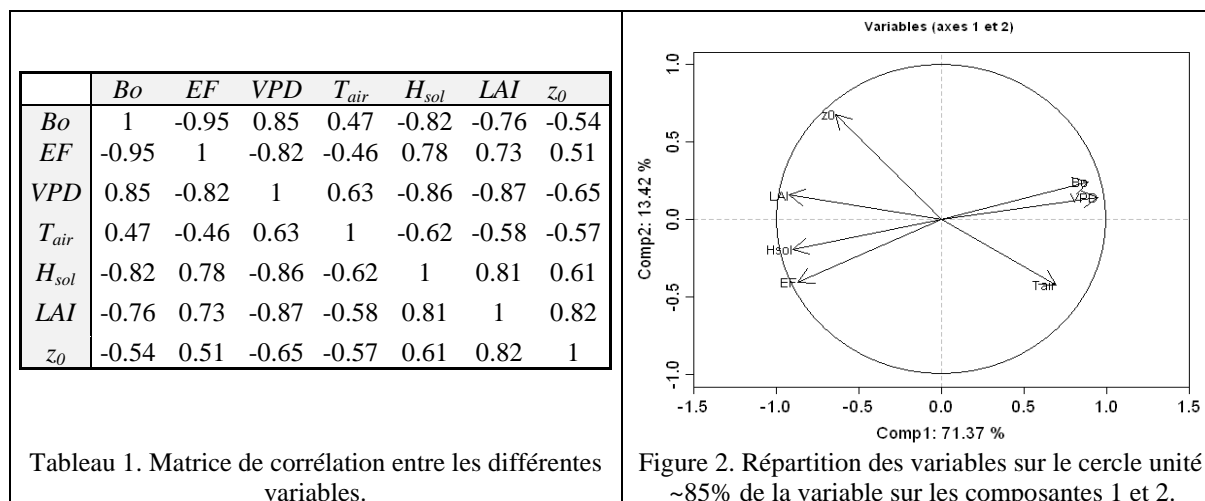
$$EF = LE / (Rn - G) = LE / (H + LE) \quad (4)$$

2. Résultats et Discussion

2.1. Cycle annuel des échanges sol/atmosphère

L'évolution des moyennes journalières (calculées à partir des données échantillonnées à la demi-heure) du rayonnement net, des flux de chaleur sensible et latente sont présentées sur la figure 1b. La saison sèche, de décembre à janvier (jours n° 01 à 26 et n°360 à 365), se caractérise par un rayonnement net relativement faible de ($75 W.m^{-2}$). Cela s'explique d'une part par une extinction du rayonnement incident pour les courtes longueurs d'onde (entre 0.3 et 3 μm) liée à la présence d'aérosols en régime d'Harmattan, et d'autre part par l'émission par la surface de rayonnement infrarouge (entre 3 et 100 μm) important ($460 W.m^{-2}$) lié à sa température qui peut atteindre ~ 60 °C en milieu de journée. Pendant cette période, la teneur en eau du sol est très faible (~ 16 mm) et l'indice foliaire de la végétation est pratiquement nul ($0.02 m^2. m^{-2}$) correspondant aux buissons épars. En conséquence, le flux de chaleur sensible est élevé ($\sim 70 W.m^{-2}$) devant le flux de chaleur latente ($\sim 17 W.m^{-2}$), ce qui se traduit par de forts rapports de bowen (> 4) et de faibles fractions évaporatives (~ 0.20). Les valeurs non nulles de LE montrent que les quelques arbustes épars présents dans la zone observée par les capteurs (footprint) transpirent et / ou que le sol évapore.

Pendant la période de transition entre mars et avril, on observe une réponse rapide de la surface après les premiers épisodes pluvieux isolés. Ainsi, entre 60 et 75 % de Rn se dissipe en évapotranspiration juste après ces événements pluvieux (figures 1c et 1d). Pendant la saison des pluies (jours n° 103 à 304), l'occurrence accrue des événements pluvieux refroidit l'atmosphère et la température de l'air atteint sa valeur annuelle minimale journalière (~ 22 °C) en août, le déficit de vapeur VPD reste inférieur à 1 kPa dénotant une très faible capacité de l'air à absorber de l'eau. La présence de nuages module fortement le rayonnement visible incident. En conséquence, pendant cette saison, on observe une grande variabilité du rayonnement net entre 50 et 200 $W.m^{-2}$. Comparativement à la saison sèche, les valeurs maximales de Rn sont plus importantes ($200 W.m^{-2}$) car l'atmosphère devient plus transparente après le lessivage des aérosols par les précipitations. De plus, le refroidissement de la surface par les processus d'évaporation réduit les pertes radiatives dans l'infrarouge. Pendant la saison humide, l'évapotranspiration est prépondérante devant le flux de chaleur sensible. LE représente $\sim 75\%$ de l'énergie disponible.



2.3. Sensibilité saisonnière *EF* versus *H_{sol}* et *z₀*

L'influence saisonnière des conditions de surface sur la fraction évaporative est illustrée par le nuage de corrélation entre respectivement (*EF*) et (*H_{sol}*) et (*z₀*) sur la figure 3. Bien qu'en apparaissant comme la troisième variable explicative de *EF*, le choix est porté sur *z₀* car cette variable est caractéristique de la végétation et est liée à la mesure *in situ* de sa hauteur alors que le *LAI* provient des données satellitaires qui correspondent à une plus grande échelle (3*3 km²) que la zone de mesure des flux (environ 100*100 m²).

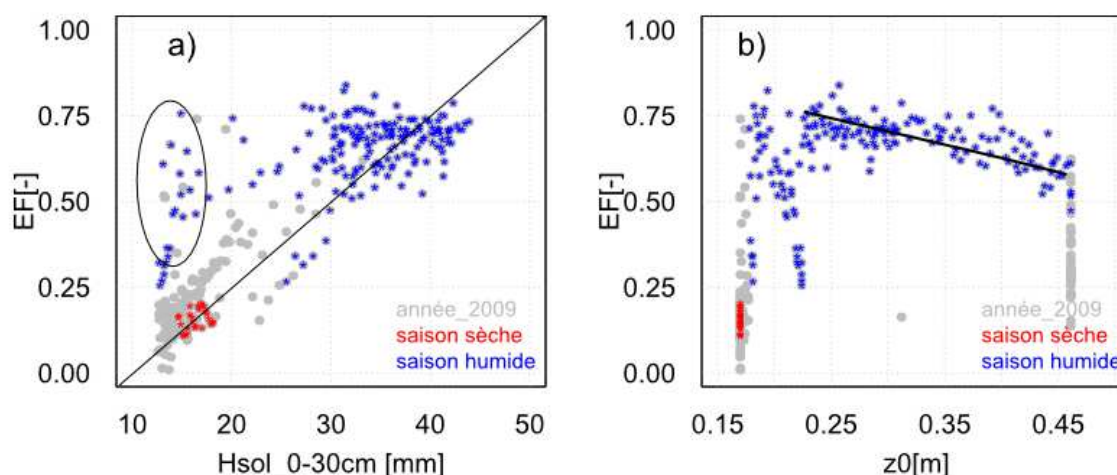


Figure 3. *EF* versus *H_{sol}* (a) et *EF* versus *z₀* (b). Les points gris représentent toute l'année 2009 ; en rouge la saison sèche et en bleu la saison humide. Sur (a) le cercle indique les jours durant lesquels sont tombés les événements pluvieux sur sol sec et la séquence sèche du mois de mai. Sur (b), le trait indique la décroissance de *EF* pour *z₀* croissant.

Sur la figure 3a, la corrélation de *EF* avec l'humidité de la couche superficielle du sol (0-30 cm), où se trouvent la grande partie du système racinaire des plantes est globalement bonne ($r = 0.78$). Toutefois, une trentaine de jours s'éloignent significativement des amas de points correspondant à la saison sèche et à la saison humide. Ce sont des jours où *EF* est élevée alors que *H_{sol}* est faible. Il s'agit d'épisodes pluvieux isolés tombant sur des sols secs (pendant la période d'humidification) et de l'épisode sec de mai durant lequel le sol s'est significativement asséché en surface. Sur la figure 3b, la corrélation *EF* et *z₀* est faible à l'échelle annuelle ($r = 0.51$). Toutefois, une décroissance linéaire de 75 à 60% s'observe pour les valeurs de *z₀* comprises entre 0.25 et 0.45 m (soit des hauteurs de couvert comprises entre 1 et 3 m). Ce résultat est la conséquence de l'augmentation du flux sensible lorsque la

rugosité du couvert augmente. Pour cette même gamme de z_0 , Bakayoko *et al.* (2007) ont observé une fraction évaporative équivalente à celle que nous avons observée en saison humide ($EF = 73\%$). Toutefois, leurs données ne permettaient pas de caractériser la fin de la saison humide et la période de flétrissement de la végétation. Inversement, la dépendance linéaire simple observée par Bagayoko *et al.* (2007) lors de la phase de croissance de la végétation n'apparaît pas sur nos données. Cette différence s'explique par la présence de pluies isolées sur sol nu lors de la mise en place de la saison des pluies qui entraînent des fortes variations de fraction évaporative sans changement de la rugosité. Pendant le reste de l'année, lorsque le sol est nu ou lorsque la végétation est à maturité, z_0 ne change pas (alignement vertical des points sur la figure 3b). La rugosité du sol n'explique pas la variabilité de la fraction évaporative pendant ces périodes.

Conclusion

La fraction évaporative (EF) a été caractérisée sur un site cultivé constitué d'une mosaïque de culture et de jachère à Nalohou (Djougou, Nord Bénin). Elle est non nulle en saison sèche où elle représente environ 20% du rayonnement net et décroît légèrement entre 75% et 60% en saison humide. L'humidité du sol et l'indice foliaire de la végétation sont les principales variables explicatives de (EF) à l'échelle annuelle. La variabilité de (EF) observée pendant la saison des pluies est expliquée par le cycle annuel de la végétation caractérisée dans cette étude par la longueur de rugosité.

Remerciements : Ce travail a été réalisé au cours d'une thèse co-financée par l'IRD, l'AUF (Bureau Afrique de l'Ouest) et l'Université d'Abomey-Calavi dans le cadre du programme AMMA et du projet Ouémé-2025. L'instrumentation a été financée par l'Observatoire AMMA-CATCH et par le projet Ouémé-2025.

Bibliographie

- Aubinet M., Grelle A., Ibrom A., Rannik, Ü, Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A. S., Martin, P. H., Berbigier, P., Bernhofer, C. and others, 1999: Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in ecology Research*, **30**: 113–175.
- Bagayoko F., Yonkeu S., Elbers, J. et van de Giesen, N.: 2007: Energy partitioning over the West African savanna: Multi-year evaporation and surface conductance measurements in Eastern Burkina Faso. *Journal of Hydrology*, 334, N° 3-4, 545–559.
- Charney J.G., 1975: Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.*, **101**, 193-202.
- Eltahir A.B.E., 1998 : A soil moisture-rainfall feedback mechanism. Theory and observations. *Water Resource Research*, 34, N° 4, 765-776.
- Cohard, J.-M and Galle, S., 2012: d and z_0 estimates for different land cover over the Donga Catchment in Benin (sudanian climate), *Communication personnelle*, LTHE, Grenoble, France.
- Guyot, A., Cohard, J.-M., Anquetin, S. and Galle, S., 2012: Long-term observations of turbulent fluxes over heterogeneous vegetation using scintillometry and additional observations: A contribution to AMMA under Sudano-Sahelian climate, *Agricultural and Forest Meteorology*, 154-155, 84–98.
- Horton R. et Wierenga P. J., 1983: Estimating the Soil Heat Flux from Observations of Soil Temperature Near the Surface. *Soil Science Society of America Journal*, **47**, 14–20.
- Koster, R. D., and the Glace Team, Paul A. Dirmeyer, Guo, Z., Bonan, G., Chan, E., Cox, P., Gordon, C. T., Kanae, S., Kowalczyk, E., Lawrence, D., Liu, P., Lu, C.-H., Malyshev, S., McAvaney, B., Mitchell, K., and others., 2004 : Regions of Strong Coupling Between Soil Moisture and Precipitation, *Science*, 305(5687), 1138 –1140.
- Lelay M. et Galle S., 2005: Variabilités interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien. *Hydrological Sciences Journal* **50** (3) 1–524.
- 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*. Rapport ANR ESCAPE, 62 p.
- Lothon M., Saïd F., Lohou F. and Campistron B., 2008: Observation of the Diurnal Cycle in the Low Troposphere of West Africa. *Monthly Weather Review* **136** (9): 3477-3500.
- Mamadou O., Galle S., Cohard J.-M, Kounouhéwa B., Diedhiou A., Biron R., et Bouktraoui S. 2012: Quality Control of eddy covariance measurements in Benin (West Africa). *International Workshop "Land Atmosphere Interactions at regional scale"*, 8-10 October 2012 Madrid. Poster.
- Taylor C. M., de Jeu R. A. M., Guichard F., Harris P. P. and Dorigo W. A., 2012: Afternoon rain more likely over drier soils. *Nature* **489** (7416): 423-426.