

IMPORTANCE DE LA PARAMETRISATION HYDRODYNAMIQUE DES PREMIERS CENTIMETRES DU SOL POUR LA MODELISATION DES FLUX DE SURFACE EN AFRIQUE DE L'OUEST

Importance of topsoil hydrodynamic parameterization for modeling land surface fluxes in West Africa

Simon Gascoïn*

UMR 7619 Sisyphe UPMC/CNRS

4 place Jussieu, 75005 Paris, France

Tél : +33 (0)1 44 27 63 27, Fax : +33 (0)1 44 27 45 88, e-mail: sgascoïn@gmail.com

*Actuellement : Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), La Serena, Chili

Le couplage entre la surface et l'atmosphère est une des clés pour comprendre la variabilité climatique en Afrique de l'ouest, notamment la sécheresse sahélienne. Au sein des processus de surface impliqués dans un tel couplage, les processus hydrologiques jouent un rôle déterminant. En particulier, les flux d'eau sont contrôlés par les propriétés physiques des premiers centimètres du sol. A l'aide d'un modèle de surface continentale on montre qu'il est possible d'améliorer la partition de l'énergie radiative entre flux de chaleur latente et sensible en freinant les échanges d'eau à travers la couche de surface. Un test de sensibilité à l'échelle de l'Afrique de l'ouest indique qu'une telle calibration entraîne une forte modification du bilan d'énergie de surface par rapport à la version standard, en particulier dans la région sahélienne où la fraction du sol nu est élevée, ce qui démontre l'importance de l'hydrodynamique des premiers centimètres du sol pour la modélisation du climat dans cette région.

Land-atmosphere coupling is critical to understand climate variability in West Africa, including the Sahel drought. Among land surface processes, hydrological processes play a major role. In the Sahel water fluxes are controlled by the soil surface layer properties. Using a land surface model we show that it is possible to improve the energy partitioning between latent and sensible heat fluxes by decreasing the water exchanges through the soil surface layer. A sensitivity test reveals that such a calibration would strongly modify the energy budget of West African surface as calculated by the default parameterization, in particular in the Sahel region where the bare soil fraction is large, which demonstrates the importance of topsoil hydrodynamic for climate modeling in this region.

MOTS CLEFS : SAHEL, SOL, CLIMAT, HYDROLOGIE

I INTRODUCTION

L'Afrique de l'ouest est considérée comme une zone où les processus de surface exercent une influence considérable sur la variabilité du climat [1]. A l'échelle annuelle, le climat de l'Afrique de l'ouest est rythmé par l'alternance d'une saison sèche et d'une saison des pluies. Au cours de la saison sèche, le vent dominant est l'Harmattan qui souffle du Sahara vers le golfe de Guinée. Avec la saison des pluies apparaît le vent de mousson, qui est dirigé dans le sens opposé. Ce retournement saisonnier des vents dans la basse atmosphère résulte de la remontée de la zone de convergence intertropicale et de l'inversion du gradient de température entre la surface du continent et la surface de l'océan. A l'instar de la mousson asiatique, la mousson africaine s'accompagne de précipitations car les masses d'air venues de l'océan transportent de l'humidité. La mousson africaine est cependant caractérisée par une bien plus forte variabilité à l'échelle interannuelle. Ainsi, la région sahélienne a connu successivement une période humide au cours des années 1950 à 1970, puis une période de sécheresse entre les années 1970 et 1990. Si le régime des précipitations au cours des deux dernières décennies s'est partiellement redressé dans la partie centrale du Sahel, le déficit pluviométrique perdure dans la partie ouest [2].

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer la sécheresse sahélienne. Certaines impliquent des facteurs globaux (gaz à effet de serre, aérosols) ; d'autres font intervenir des mécanismes de rétroactions entre la surface continentale et l'atmosphère via les flux d'eau et d'énergie [3].

Dans ce type de rétroactions, les processus hydrologiques peuvent jouer un rôle clé. Il existe une chaîne de rétroactions positives entre l'humidité du sol et les précipitations [4]. Des observations de ce couplage ont été

rapportées au Sahel [5]. A l'échelle globale, des expériences numériques avec des modèles de circulation générale ont montré que le temps de résidence de l'eau dans le sol influence notablement la variabilité des précipitations [6,7].

Dans la région sahélienne, l'importance de la croûte de sol imperméable dans les processus hydrologiques a été démontrée [8,9] : ce sont les propriétés physiques des premiers centimètres du sol, et non la végétation, qui contrôlent la séparation des précipitations efficaces entre infiltration et ruissellement de surface. Cette couche superficielle module aussi le flux de chaleur latente, ce qui a récemment conduit Saux Picart [10] à l'intégrer dans un modèle de surface appliqué à la zone sahélienne pour mieux reproduire le bilan hydrique de surface.

A l'aide d'un modèle de surface continentale nous avons étudié l'effet de cette couche de surface sur les bilans d'eau et d'énergie dans un site sahélien où l'on dispose de données pour évaluer les simulations. Avec le même modèle nous avons testé son effet à l'échelle subcontinentale de l'Afrique de l'ouest.

II DONNEES ET METHODE

Les données ont été obtenues dans le cadre du projet ALMIP (AMMA Land surface Model Intercomparison Project [11]). Nous disposons de six années (2002-2007) de forçages météorologiques au pas de temps 3h ainsi que les paramètres de sol, végétation et topographie sur une grille de résolution de 0.5° entre 20°W à 30°E et 5°S à 20°N [12]. Dans cet article, la bande équatoriale a été exclue du domaine analysé qui est restreint aux latitudes 5°N-20°N. Le projet comportait trois expériences, correspondant à trois jeux de données météorologiques distincts : ici nous avons utilisé le troisième jeu de données où les précipitations proviennent de TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission).

Le modèle utilisé est CLSM (Catchment Land Surface Model [13]). Il s'agit d'un modèle de surface continentale : sa fonction est de calculer les flux d'eau et d'énergie entre la surface continentale et l'atmosphère. La caractéristique principale de CLSM est qu'il utilise les concepts du modèle hydrologique TOPMODEL [14] pour représenter l'effet de la topographie sur les écoulements (surface et subsurface) et la distribution de l'humidité du sol.

Les simulations de CLSM réalisées à l'échelle du domaine ALMIP ont été validées par la comparaison avec celles des dix autres modèles du projet [11]. CLSM présente certaines spécificités dans la distribution spatiale des flux d'eau et d'énergie car il est le seul modèle du projet à prendre en compte la topographie [12]. Une étude plus détaillée des bilans d'eau à l'aide des données gravimétriques du satellite GRACE a également mis en évidence un plus grand effet mémoire dans le contenu en eau du sol [15]. Toutefois, ces différences sont mineures dans la zone sahélienne sur laquelle se concentrent les analyses suivantes.

Pour cette étude nous avons modifié un paramètre de CLSM qui contrôle l'intensité des flux d'eau dans les deux premiers centimètres du sol. Ce paramètre (noté AT) est initialement déduit de la résolution de l'équation de Richards en fonction des caractéristiques du sol, mais des travaux précédents ont révélé qu'il pouvait être nécessaire de l'augmenter de deux ordres de grandeur pour reproduire correctement les variations d'humidité dans cette couche superficielle [16].

Les simulations de CLSM pour différentes valeurs de AT ont d'abord été analysées à l'échelle du site d'observation sahélien du Gourma malien, où l'on dispose de mesures du flux de chaleur sensible qui peuvent être directement comparées avec les simulations car elles ont été agrégées sur une surface de 0.5° de côté (1,5°W ; 15,5°N) équivalente à la maille de modélisation [17]. D'après nos données, ce domaine est couvert à 87% par du sol nu (13% végétation de type prairies), par conséquent l'évapotranspiration est dominée par l'évaporation du sol, elle est donc contrôlée par les caractéristiques du sol. Ensuite, nous avons étudié la sensibilité des flux turbulents à l'échelle de l'Afrique Sahélienne en multipliant AT par 100 de façon uniforme sur toutes les mailles du domaine ALMIP.

III RESULTATS

III.1 Echelle locale

Le tableau 1 montre l'impact de différentes valeurs AT sur les flux de surface moyens et donne les biais entre les flux de chaleur sensible simulés et observés pour chaque valeur. Les valeurs élevées de AT permettent de réduire ce biais, ce qui signifie que la partition de l'énergie radiative entre évaporation et chaleur sensible est plus proche de la réalité. En effet, AT diminue la pénétration dans le sol en augmentant la

fraction du ruissellement de surface. La conséquence est une diminution du flux d'eau descendant de la zone racinaire vers la nappe, mais également un affaiblissement des remontées d'eau par demande évaporative, car la recharge du stock d'eau dans le sol durant les mois de mousson est alors plus limitée. L'effet « mémoire » du modèle s'en trouve affaibli : une corrélation croisée entre les séries de précipitations et d'évapotranspiration totale révèle que les deux signaux sont fortement corrélés (au niveau de confiance 95%) durant une période de 105 jours pour STD et AT01 alors que cette période n'est plus que de 70 et 74 jours pour AT100 et AT10.

Simulation	STD	AT01	AT10	AT100
H (W/m ²)	27.3	26.8	36.0	39.6
Biais H (W/m²)	-18.9	-19.4	-10.2	-6.6
E (mm/j)	1.45	1.51	0.90	0.68
Ev (mm/j)	0.39	0.39	0.32	0.28
Es (mm/j)	1.05	1.11	0.56	0.38
R↓ (10 ⁻² mm/j)	2.20	2.30	0.87	0.32
R↑ (10 ⁻² mm/j)	1.16	1.26	0.29	0.08
Qs/P (%)	7.67	6.35	40.2	58.5

Tableau 1 : Effet de AT sur les flux simulés dans le domaine sahélien du Gourma (1,5 W; 15,5 N). H : flux de chaleur sensible, E : évaporation totale, Ev : transpiration, Es : évaporation du sol nu, R↓, R↑ : flux d'eau dans la zone racinaire (descendant et ascendant), Qs : ruissellement de surface, P : précipitations. Les valeurs sont des moyennes journalières calculées sur la période entre juin et décembre pour les années 2005, 2006 et 2007. Dans la simulation STD les valeurs de AT sont les valeurs standard. Dans la simulation AT01, AT10 et AT100, les valeurs de AT ont été respectivement multipliées par 0.1, 10 et 100.

III.2 Echelle du Sahel

La figure 1 montre la simulation AT100 à l'échelle du domaine complet. Conformément à l'analyse précédente, l'évapotranspiration totale est fortement réduite par l'augmentation de AT car la couche de surface est rendue moins perméable, ce qui limite la recharge. L'énergie disponible est convertie en chaleur sensible. Le gradient de chaleur latente qui traverse le Sahel entre le Sahara et la côte guinéenne est réduit de moitié. Cet effet est remarquable car le gradient méridional des flux de surface est un des moteurs identifiés de la mousson africaine [18].

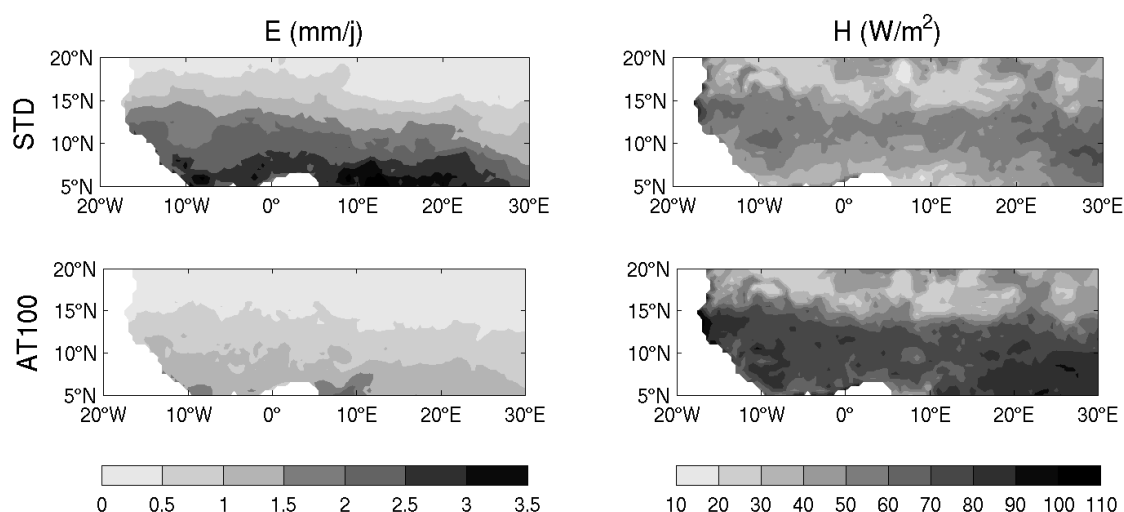


Figure 1 : Comparaison des flux turbulents (E : évapotranspiration totale, H : flux de chaleur sensible) calculés dans la simulation standard (STD) et après modification de AT (AT100). Les moyennes sont calculées sur la période 2003-2007.

IV CONCLUSION

La couche de surface est la principale porte d'entrée et de sortie de l'eau dans le sol, en particulier en zone sahélienne où la fraction du sol nu est considérable et les prélèvements racinaires limités. La paramétrisation hydrodynamique des premiers centimètres du sol dans un modèle de surface continentale module directement la partition de l'énergie radiative en chaleur latente et sensible. Ainsi, nous avons montré qu'il est possible d'améliorer le calcul des flux de surface en contexte sahélien en freinant les échanges d'eau dans la couche de surface d'un modèle de surface continental. Si ce résultat est généralisé à l'échelle du Sahel, cela entraîne une réorganisation spatiale des flux de surface. Il reste à montrer si des changements dans la couche de surface peuvent entretenir l'affaiblissement de la mousson par rétroaction positive. Une voie prometteuse pour élucider ces rétroactions qui impliquent l'hydrologie des premiers centimètres du sol réside dans l'intégration des données du satellite SMOS [19].

V REMERCIEMENTS

Je remercie sincèrement mes directeurs de thèse Agnès Ducharne et Pierre Ribstein pour m'avoir guidé sur les terres africaines et ailleurs. Ce travail a bénéficié des commentaires de Thierry Lebel et Isabelle Braud, rapporteurs de ma thèse, et des remarques de Katia Laval, qui m'a fait l'honneur de présider le jury. Je remercie également Aaron Boone et Patricia de Rosnay, organisateurs du projet ALMIP. Les données du site Gourma ont été aimablement fournies par Laurent Kergoat.

VI REFERENCES

- [1] Koster, R. D., Dirmeyer, P. A., 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., Mocko, D., Oki, T., Oleson, K., Pitman, A., Sud, Y. C., Taylor, C. M., Verseghy, D., Vasic, R., Xue, Y., & Yamada, T. (2004). - Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, **305**, 1138-1141.
- [2] Lebel, T. & Ali, A. (2009). - Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990 - 2007). *J. Hydrol.*, **375**, 52-64.
- [3] Nicholson, S. (2000). - Land surface processes and Sahel climate. *Rev. Geophys.*, **38**, 117-140.
- [4] Eltahir, E. A. B. (1998). - A soil moisture-rainfall feedback mechanism 1. Theory and observations. *Wat. Res. Res.*, **34**, 765-776.
- [5] Taylor, C. M. & Lebel, T. (1998). - Observational evidence of persistent convective-scale rainfall patterns. *Mon. Weather Rev.*, **126**, 1597-1607.
- [6] Delworth, T. & Manabe, S. (1989). - The influence of soil wetness on near-surface atmospheric variability. *J. Clim.*, **2**, 1447-1462.
- [7] Koster, R. D. & Suarez, M. J. (1995). - Relative contributions of land and ocean processes to precipitation variability. *J. Geophys. Res.*, **100**, 13775-13790.
- [8] Braud, I., Bessemoulin, P., Monteny, B., Sicot, M., Vandervaere, J. P. & Vauclin, M. (1997). - Unidimensional modelling of a fallow savannah during the HAPEX Sahel experiment using the SiSPAT model. *J. Hydrol.*, **188-189**, 912-945.
- [9] Peugeot, C., Esteves, M., Galle, S., Rajot, J. L. & Vandervaere, J. P. (1997). - Runoff generation processes : results and analysis of field data collected at the east central supersite of the Hapex-Sahel experiment. *J. Hydrol.*, **188-189**, 179-202.
- [10] Saux Picart, S. (2008). - Etude couplée modélisation/téledétection pour le suivi des états et bilans hydriques de surface en zone sahélienne. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie, Paris.

- [11] Boone, A., de Rosnay, P., Balsamo, G., Beljaars, A., Chopin, F., Decharme, B., Delire, C., Ducharne, A., Gascoin, S., Guichard, F., Gusev, Y., Harris, P., Jarlan, L., Kergoat, L., Mougin, E., Nasonova, O., Norgaard, A., Orgeval, T., Ottlé, C., Pocard-Leclercq, I., Polcher, J., Sandholt, I., Saux-Picart, S., Taylor, C. & Xue, Y. (2009). - The AMMA Land Surface Model Intercomparison Project (ALMIP). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90(12)**, 1865-1880.
- [12] Gascoin, S. (2009). - Etude des paramétrisations hydrologiques d'un modèle de surface continentale : importance des aquifères et des premiers centimètres du sol. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie, Paris. En ligne : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00399672/fr/>
- [13] Koster, R. D., Suarez, M. J., Ducharne, A., Stieglitz, M. & Kumar, P. (2000). - A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model 1. Model structure. *J. Geophys. Res.*, **105**, 24809-24822
- [14] Beven, K. & Kirkby, M. J. (1979). - A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, **24(1)**, 43-69.
- [15] Grippa, M., L. Kergoat, F. Frappart, Q. Araud, A. Boone, P. de Rosnay, J.-M. Lemoine, S. Gascoin, G. Balsamo, C. Otle, B. Decharme, & S. Saux-Picart (2010). - Land water storage changes over West Africa estimated by GRACE and land surface models. *Wat. Res. Res.* (en révision).
- [16] Gascoin, S., Ducharne, A., Ribstein, P., Lejeune, Y. & Wagnon, P. (2009). - Dependence of bare soil albedo to soil moisture on the moraine of the Zongo glacier (Bolivia): implications for land surface modeling. *J. Geophys. Res.*, **114**, D19102.
- [17] Timouk, F., Kergoat, L., Mougin, E., Lloyd, C. R., Ceschia, E., Cohard, J.-M., de Rosnay, P., Hiernaux, P., Demarez, V. & Taylor, C. M. (2009). Response of heat and radiation fluxes to water regime and vegetation development in a sahelian landscape. *J. Hydrol.*, **375**, 178-189.
- [18] Eltahir, E. A. B. & Gong, C. (1996). - Dynamics of Wet and Dry Years in West Africa. *J. Clim.*, **9**, 1030-1042.
- [19] Kerr, Y. H.; Waldteufel, P.; Wigneron, J.-P.; Martinuzzi, J.; Font, J. & Berger, M. Soil moisture retrieval from space: the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. - *IEEE T. Geosci. Remote*, **39(8)**, 1729-1735.