

## **Variabilité climatique et variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest : Un système couplé**

A. Afouda, J.-M. Bouchez, I. Braud, F. Cazenave, C. Depraetere, N. Dessay, A. Diedhiou, S. Galle, H. Gallée, M. Gosset, R. Haverkamp, H. Laurent, L. Le Barbé, T. Lebel, C. Messenger, H. Onibon, P. Reggiani

LTHE, BP 53, 38041 Grenoble Cédex 9, France, Thierry Lebel@hmg.inpg.fr

---

*La variabilité climatique, lorsqu'elle se traduit par de longues périodes de sécheresse ou d'excès d'eau, a des conséquences qui peuvent être durables sur le cycle hydrologique. Ceci est particulièrement vrai pour les régions semi-arides, qui représentent 1/3 des surfaces continentales dans le monde. Ces régions sont composées de pays à forte croissance démographique, ce qui pèse à la fois sur la quantité et la qualité des ressources en eau disponibles pour les populations. Dans un tel contexte la variabilité du climat a un impact sur les ressources en eau que l'hydrologue se doit de quantifier. Pour cela, il est nécessaire de comprendre les interactions entre dynamique atmosphérique, modifications durables de la végétation (liées notamment à la déforestation) et cycle hydrologique continentale. Ces interactions se manifestent à différentes échelles ce qui impose une réflexion à la fois sur les observations et sur les modèles requis pour faire progresser nos connaissances. L'Afrique de l'Ouest est une région où ces questions sont particulièrement d'actualité du fait de la sécheresse qui l'a touchée dans les années 70 et 80, ce qui a conduit à la mise sur pied du système d'observation CATCH (Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique), qui fonctionne depuis la fin des années 90. Plus récemment, une initiative a vu le jour dans le cadre de plusieurs programmes nationaux, se fixant pour objectif de mener à bien une étude intégrée et multi-échelle sur la dynamique et la chimie atmosphérique, l'hydrologie et les conditions de surface au sein de la Mousson Ouest-Africaine. On discute brièvement ici des échelles qui sont à considérer pour l'étude du couplage entre l'atmosphère et le cycle hydrologique dans cette région.*

---

### **1. Introduction.**

Un des enjeux majeurs des recherches sur la variabilité climatique est de quantifier l'impact de cette variabilité sur le cycle hydrologique et les ressources en eau. Ceci est particulièrement vrai en zone tropicale, notamment en climat semi-aride où le couplage entre l'atmosphère et les surfaces continentales est beaucoup plus étroit que dans les zones tempérées. Ceci tient à deux raisons principales. Tout d'abord l'ETP est de façon presque permanente supérieure aux précipitations et il y a donc un assèchement très rapide de la réserve en eau des sols entre deux événements pluvieux. Toute baisse de précipitation par rapport à la normale a donc un impact immédiat et prononcé sur le cycle de l'eau continental. Ensuite, la végétation joue un rôle primordial dans le bilan énergétique et hydrique de l'atmosphère tropicale. Il en résulte une rétroaction importante de la surface sur le recyclage des précipitations.

Les conditions socio-économiques qui prévalent dans la ceinture tropicale semi-aride induisent par ailleurs des conséquences très fortes, voire dramatiques, sur les populations en cas de sécheresse, comme cela s'est vu en Afrique de l'Ouest et de l'Est au cours de ces trente dernières années. Il est

donc extrêmement important de comprendre, pour pouvoir mieux les prévoir, les interactions qui existent entre fluctuations climatiques, modification des conditions de surface (par dégradation du couvert végétal notamment) et variabilité hydrologique dans la zone tropicale.

L'Afrique de l'Ouest constitue de ce point de vue une région particulièrement intéressante à étudier, dans la mesure où il s'agit d'un ensemble très vaste (6.000.000 km<sup>2</sup>), régi par un climat de mousson à symétrie zonale, frappé au cours des années 70 et 80 par une sécheresse continue, et qui connaît par ailleurs une modification profonde de sa couverture végétale. On ne prétend pas traiter ici de tous les facteurs qui conditionnent la dynamique de la mousson ouest-africaine et sa variabilité. On pourra se reporter pour cela au livre blanc publié récemment sur le sujet (GT Mousson, 2001). Un enjeu important du programme prévu dans ce livre blanc est de faire la part entre le forçage océanique et le forçage continental sur la mousson ouest-africaine. On se contentera ici de discuter des échelles qui sont à prendre en compte pour mieux comprendre les interactions entre variabilité pluviométrique et variabilité hydrologique dans cette région.

## **2. Les échelles de la variabilité pluviométrique en Afrique de l'Ouest**

En Afrique de l'Ouest, la variabilité spatiale des champs pluviométriques est très forte sur une large gamme d'échelles temporelles. Les études récentes ont montré que cette variabilité était largement contrôlée i) par la fréquence d'occurrence de gros systèmes convectifs qui produisent près de 80% du couvert nuageux et de la pluie (e.g. Mathon et Laurent, 2001) et ii) par la variabilité interne des champs pluvieux associés (voir e.g. Lebel et Amani, 1999). Il est donc essentiel de disposer d'une représentation réaliste des champs de pluie associés à ces systèmes convectifs si l'on veut rendre compte de la réponse des systèmes hydrologiques au forçage pluviométrique. Dans la perspective d'un couplage entre modèles atmosphériques et modèles hydrologiques, il est donc central que les premiers fournissent une information liée au cycle de vie et à la variabilité interne des systèmes convectifs, afin notamment de pouvoir utiliser des scénarios climatiques à des fins d'étude d'impact sur les ressources en eau. Du fait de leur faible résolution spatiale, les Modèles de Circulation Générale actuellement disponibles fournissent des sorties pluviométriques inadéquates de ce point de vue. Lebel et al.(2000) par exemple ont montré que les MCG tendaient à produire sur cette région un nombre trop grand de jours de pluie au cumul trop élevé (Figure 1). Cette surestimation des pluies extrêmes engendre des biais amplifiés en sortie des modèles hydrologiques.

La modélisation climatique régionale est susceptible d'apporter une réponse à ce problème de résolution spatiale. Fonctionnant à des résolutions de l'ordre de 10 km x 10 km, ces modèles, forcés aux frontières par des modèles globaux fournissent une image beaucoup plus réaliste que ces derniers et avec une résolution qui permet d'envisager un forçage direct des modèles hydrologiques. Des premières simulations, à une résolution de 40 km x 40 km, ont été réalisées à l'aide d'un modèle climatique régionale – le MAR (Gallée et Schayes, 1994) – sur les années 1987 et 1992. Elles montrent un réalisme satisfaisant, qui permet d'envisager en aval l'utilisation d'un modèle de désagrégation stochastique, déjà développé et testé sur le Sahel, pour obtenir des séries pluviométriques à une résolution de l'ordre du kilomètre carré (Figure 2). Cette démarche vise uniquement à travailler en mode de forçage simple, sans retour vers l'atmosphère. Elle est adaptée à la production de scénarios hydro-climatologiques, en supposant que le comportement du système couplé Continent-Atmosphère reste peu modifié. Cette dernière hypothèse est loin d'être totalement prouvée et Il est donc nécessaire d'envisager dès maintenant le développement de modèles couplés, ce qui requiert de bien prendre en compte les rétro-actions de la surface continentale vers l'atmosphère tropicale.

### 3. Les échelles de la rétroaction entre la surface et la pluie

La surface continentale rétroagit sur la pluviométrie à différentes échelles spatiales et temporelles. A l'échelle régionale, Charney (1975) fut le premier à évoquer une possible rétroaction de la dégradation du couvert végétal sur les pluies au Sahel, par le biais de la modification d'albedo. Plusieurs simulations numériques réalisés à l'aide de MCG plus performants que ceux disponibles à l'époque de Charney, incluant notamment une représentation plus réaliste du cycle de l'eau atmosphérique, ont montré une certaine sensibilité de la mousson ouest-africaine aux conditions de la surface continentale (champ des humidités des sols par exemple, voir Douville et al., 2000). D'autres simulations, utilisant des modèles 2D à symétrie zonale, montrent l'importance de la végétation dans la dynamique de la mousson ouest-africaine (e.g. Zheng and Eltahir, 1998). Plusieurs études convergentes (Eltahir and Gong, 1996 ; Fontaine et al. 1999 ; Le Barbé et al., 2001) mettent également en évidence l'importance des gradients méridiens d'énergie sur cette dynamique de mousson, gradients méridiens qui sont eux-mêmes contrôlés par les contrastes méridiens océan-continent et par le gradient méridien de végétation sur le continent. Enfin, des études récentes semblent indiquer que la deuxième saison des pluies sur la côte en année  $n$  pourrait exercer un contrôle sur la saison des pluies au Sahel en année  $n+1$ . Ce contrôle pourrait passer par la mémoire de la surface continentale, via la végétation notamment.

En ce qui concerne la méso-échelle, les modèles non hydrostatiques sont désormais à même de fournir des simulations réalistes des lignes de grains sahéliennes (Redelsperger et al., 2001). Il devient donc possible d'étudier l'influence des conditions de surface sur le cycle de vie des systèmes convectifs. On sait déjà que les zones de relief constituent un terrain privilégié pour l'initiation de ces systèmes, susceptibles d'évoluer en ligne de grains (Mathon et Laurent, 2001). Il reste à explorer le rôle joué par les gradients d'humidité dans leur initiation et dans le maintien de leur dynamique.

A l'échelle convective, les travaux de Taylor and Lebel (1998) constatent sur le degré carré de Niamey des effets de persistance dans l'organisation spatiale des champs de pluie associés à deux systèmes convectifs consécutifs, dès lors qu'il ne s'écoule pas plus de 48 heures entre le passage des deux systèmes. Les couples de stations qui enregistrent un gradient de pluie supérieure à 5 mm lors du passage du premier système montrent une probabilité significative d'enregistrer un gradient de même signe lors de l'événement suivant. Dans certaines circonstances favorables, ces gradients peuvent se maintenir durant toute une saison des pluies et expliquer la très forte variabilité spatiale des champs de pluie saisonniers au Sahel (300 mm sur 10 km en plusieurs occasions).

### 4. Discussion et conclusions.

Le bref survol réalisé ci-dessus montre la diversité des échelles auxquelles l'atmosphère et la surface continentale sont en interaction dans le cas de la mousson ouest-africaine. Observations et simulations numériques ont permis au cours des années récentes de mettre en évidence certaines échelles privilégiées qu'il est souhaitable de documenter plus précisément que cela n'est possible actuellement à partir des réseaux opérationnels de la région. C'est pourquoi le système d'observation CATCH (Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique) a été mis sur pied en 1997, avec pour objectif de documenter la variabilité pluviométrique et hydrologique sur une fenêtre de 5° de latitude par 9° de longitude (Galle et al., 2001). Ce système d'observation servira de base pour le suivi à long terme (10 années) dans le cadre du programme « Mousson Ouest- Africaine » qui inclura également des observations intensives sur des durées plus courtes. Ce programme sera l'occasion de tester de nouvelles approches de modélisation hydrologique, a priori mieux adaptées au couplage avec des modèles atmosphériques (Braud et al., 2001a, 2001b).

## Références:

- Braud, I., De Condappa, D., Soria, J., Galle, S., Haverkamp, R. and Vauclin, M., 2001a. Scaled forms of the infiltration equation: application to the estimation of the unsaturated soil hydraulic properties, **submitted to European Journal of Soil Science.**
- Braud, I., N. Varado, S. Galle, R. Haverkamp, T. Lebel and P. Reggiani. Modélisation hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à l'aide du modèle POWER. Atelier AMA, 3-5 décembre 2001, Toulouse, France.
- Charney, J. G. (1975). Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.* **101**(428): 193-202.
- Douville, H., F. Chauvin, and H. Broqua (2000). Influence of soil moisture on the Asian and African monsoons., Note de centre CNRM N°72, Novembre 2000, 27 p. +Fig.
- Eltahir, E.A.B., and C. Gong, 1996: Dynamics of wet and dry years in West Africa. *J. Climate*, **9**, 1030-1042.
- Fontaine, B., N. Philippon, and P. Camberlin, 1999: An improvement of June-September rainfall forecasting in the Sahel based upon region April-May moist static energy content (1968-1997). *Geophysical Research Letters*, **26**(14), 2041-2044.
- Galle, S., Angulo Jaramillo, R., Braud, I., Boubkraoui S., Bouchez J.M., de Condappa D., Derive G., Gohoungossou A., Haverkamp R., Reggiani P., Soria-Ugalde J., 2001. Estimation of soil hydrodynamic properties of the Donga watershed (CATCH-Bénin), Proceedings of the GEWEX 4<sup>th</sup> International Conference, Paris, France, 10-14 September 2001, p. 136.
- Gallée H. and Schayes G., 1994. Development of a Three-Dimensional Meso--gamma Primitive Equations Model : Katabatic Winds Simulation in the area of Terra Nova Bay, Antarctica. *Monthly Weather Review* **122**, 671—685.
- GT Mousson Africaine, 2001. French White Book on African Monsoon & its Various Components. Document PATOM, PNCA, PNEDC, PNRH, Septembre 2001.
- Lebel, T. et A. Amani, 1999. Rainfall estimation in the Sahel : what is the ground truth ? *J. Appl. Meteor.* **38**, 555-568.
- Lebel Th., F. Delclaux, L. Le Barbé, and J. Polcher, 2000 : From GCM scales to hydrological scales: Rainfall variability in West Africa. *Stoch. Env. Res. Risk Ass.*, **14** : 275-295.
- Le Barbé, L., Th. Lebel, and D. Tapsoba, 2001 : Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990. *J. Climate*, **In print.**
- Mathon, V., and H. Laurent, 2001: Life cycle of the Sahelian mesoscale convective cloud systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 377-406.
- Redelsperger, J.-L., A. Diongue, A. Diedhiou, J.-P. Céron, M. Diop, J.-F. Guérémy, J.-P. Lafore, 2001. Multi-scale description of a Sahelian weather system representative of the West African monsoon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **In print.**
- Taylor, C., and T. Lebel, 1998: Observational evidence of persistent convective scale rainfall patterns. *Monthly Weather Rev.*, **126**, 1597-1607.
- Zheng, X., and E.A.B Eltahir, 1998: The role of vegetation in the dynamics of West African monsoons, *J. Climate*, **11**, 2078-2096.

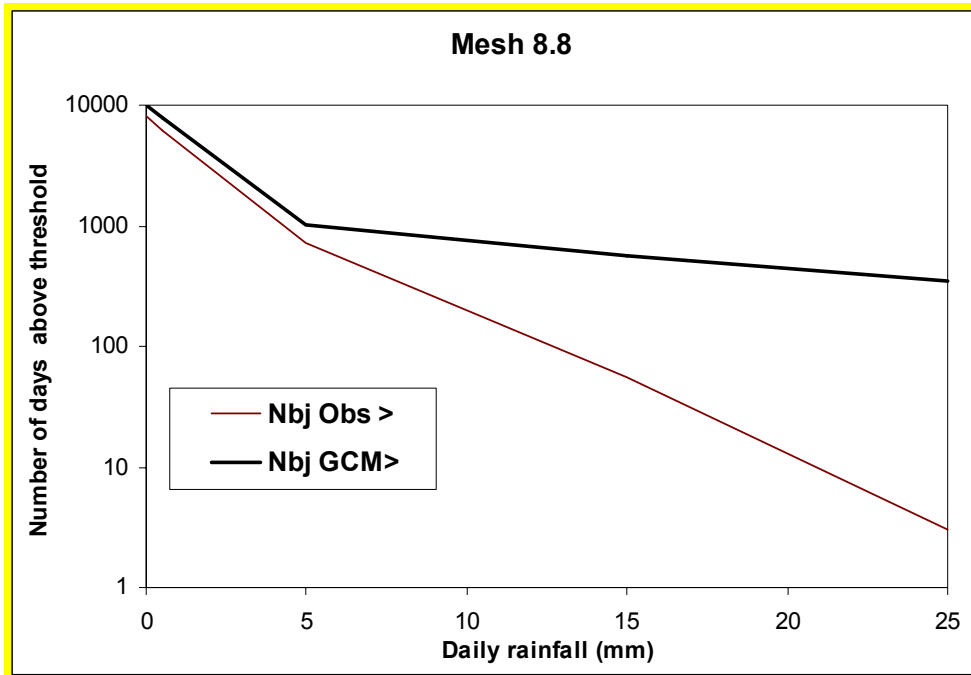


Figure 1. Distribution des pluies journalières d'un ensemble de simulations climatiques sur l'Afrique de l'Ouest pour la période 1960-1990. Comparaison avec la distribution des pluies observées. Moyennes sur une maille de modèle couvrant 1.65° en latitude par 3.75° en longitude.

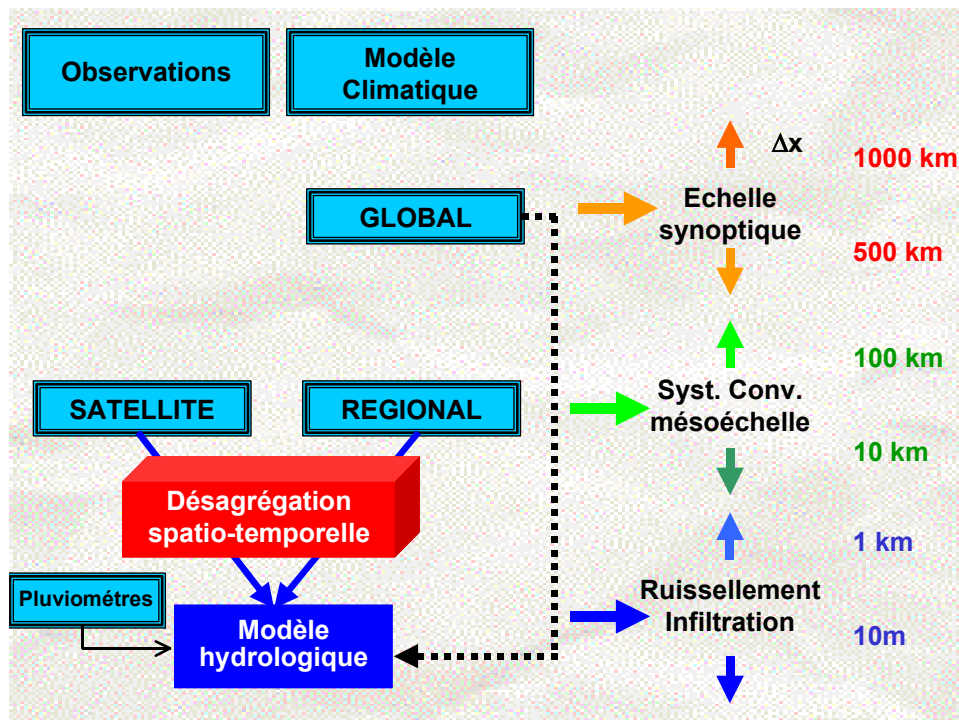


Figure 2. Passage des échelles atmosphériques aux échelles hydrologiques à l'aide d'un modèle stochastique de désagrégation.