

Modélisation hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à l'aide du modèle POWER

I. Braud, N. Varado, S. Galle, R. Haverkamp, T. Lebel, P. Reggiani

LTHE, BP 53, 38041 Grenoble Cédex 9, France, Isabelle.Braud@hmg.inpg.fr

Nous présentons ici le modèle hydrologique à base physique (POWER) qui sera testé et validé sur un sous-bassin de l'Ouémé dans le cadre du projet CATCH au Bénin. Les principes du modèle ainsi que la stratégie d'observations retenue pour sa mise en œuvre et sa validation sont présentés.

1. Introduction.

L'un des objectifs du projet CATCH (Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique) est de quantifier l'impact des fluctuations climatiques (notamment pluviométriques) sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Pour ce faire, il est important de pouvoir disposer de modèles représentant le cycle de l'eau dans son ensemble (précipitations, infiltration, évapotranspiration, ruissellement, recharge des nappes, écoulement dans les rivières) sur de longues périodes de temps. Les modèles de type conceptuels sont séduisants car ils ne nécessitent que peu de paramètres et permettent en général de reproduire de façon satisfaisante les composantes du cycle hydrologique. Néanmoins, ces modèles requièrent en général une calibration, ce qui exclut leur extrapolation en dehors des situations utilisées pour cette calibration. Il est donc nécessaire d'utiliser des modèles à base physique, capables de prendre en compte les évolutions dans le temps des caractéristiques de la surface, pour répondre à la question de l'évolution des ressources en eau. Les modèles s'appuyant sur la résolution d'équations aux dérivées partielles, en général dérivées à l'échelle locale dans des contextes différents, mais extrapolées sur des mailles beaucoup plus grandes, ne donnent pas satisfaction car ces modèles, en général surparamétrés sont très difficiles à calibrer. D'où la nécessité de développer des approches de modélisation intermédiaires. C'est le parti pris dans le concept de modélisation proposé par Reggiani et al. (1998, 1999, 2000, 2001a) et sur lequel s'appuie le modèle POWER. Les principes de modélisation sont décrits dans la deuxième partie et les étapes de son application sur le sous-bassin versant de la Donga (580 km²) au Bénin sont présentées dans un troisième temps.

2. Le modèle POWER.

Le modèle, POWER (**P**lanner **O**riented evaluative **W**atershed model for **E**nvironmental and socio-economic **R**esponses) s'appuie sur une discrétisation du bassin versant en sous-bassins élémentaires (REWs) obtenus grâce à l'analyse d'un modèle numérique de terrain. Les REWs sont des entités spatiales dont la géométrie est déterminée par le réseau hydrographique et forment donc des régions d'intégration spatiale logiques pour les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Cinq zones sont considérées à l'intérieur d'un REW: les zones saturées et non-saturée dans le sol, la surface non-saturée sur laquelle peut se produire du ruissellement concentré, la surface saturée et la rivière. Les équations fondamentales de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie sont intégrées, pour chacune des zones, sur l'ensemble d'un REW.

Ceci conduit à des équations différentielles ordinaires qui ne dépendent plus de l'espace et dont la forme générale est la suivante:

$$\frac{d\psi}{dt} = \sum_i e_i^\psi + U + G \quad (1)$$

Dans cette équation, ψ représente la masse, la quantité de mouvement ou l'énergie. Les termes e_i^ψ sont les termes d'échange pour ψ intégrés à l'échelle du REWs, U représente les apports externes pour ψ et G la production interne de ψ à l'intérieur d'un REW. A titre d'illustration, les termes d'échange e_i^ψ sont, dans l'équation de conservation de la masse, les flux d'évapotranspiration, de drainage vers la nappe pour la zone non saturée du sol; la recharge de la nappe (ou les remontées capillaires), les écoulements latéraux d'un REW à l'autre ou vers l'extérieur du bassin, les échanges nappe-rivière, pour la zone saturée du sol. Pour l'équation de conservation de la quantité de mouvement, ces termes d'échange incluent toutes les forces de pression s'exerçant sur les limites des différentes zones considérées à l'intérieur d'un REW. Ces limites ont des formes géométriques complexes qui sont déterminées lors de l'analyse de la topographie du bassin versant à l'aide du modèle numérique de terrain.

Les termes e_i^ψ d'échange issus du processus d'intégration sur le REW constituent des inconnues du problème. La fermeture du système nécessite de se doter de relations supplémentaires, dites relations constitutives sur lesquelles un certain nombre de contraintes ont pu être définies grâce à l'application du second principe de la thermodynamique (Reggiani et al., 1998). L'ensemble de ces équations et relations constitutives permettent de calculer les écoulements dans les zones saturées et non-saturée du sol, le ruissellement de surface (sur zone saturée ou non) et les écoulements dans la rivière.

Dans sa conception initiale, le modèle POWER ramène le bassin versant à un ensemble de points (les centres de gravité des différents REWs), pour lesquels sont calculés des valeurs moyennes caractéristiques de chaque zone, et de chenaux connectés entre eux. Afin d'améliorer la définition des flux d'échange dans la zone non-saturée, un découpage supplémentaire de cette zone est envisagé. Il consiste à définir des zones homogènes en surface à partir de cartes de texture des sols, de géologie, d'occupation des sols, etc.. sur lesquelles les écoulements dans la zone non-saturée seront résolus de manière plus précise afin de définir le flux d'évapotranspiration et d'échange avec la zone saturée, ainsi que les termes de pression, par moyenne pondérée des flux élémentaires. Des études récentes ont en effet montré que la définition de propriétés hydrodynamiques équivalentes à un sol hétérogène ne permettait pas, en général, de reproduire les bons flux, notamment en infiltration, alors qu'une moyenne pondérée le permettait (Soria et al., 2001).

Ce module de zone non-saturée est encore en cours d'élaboration. Il est prévu d'implémenter plusieurs options en fonction des données d'entrée disponibles. Si on ne dispose que d'une évapotranspiration journalière, on utilisera un modèle simple tel que le modèle de Ritchie (1972) ou une fonction de l'humidité pour tenir compte du stress hydrique. Si des données climatiques à pas de temps plus fin sont disponibles, le bilan d'énergie et l'équation de transfert de chaleur dans le sol seront résolus de manière explicite. A terme, ces données climatiques pourraient être fournies par un modèle atmosphérique couplé au modèle hydrologique.

3. Application au sous-bassin de la Donga au Bénin.

Un site atelier a été instrumenté en climat soudanien, sur le bassin versant de l'Ouémé au Bénin, depuis 1997 afin de constituer une base de données hydro-météorologiques documentant les composantes du cycle hydrologique et ses fluctuations (pluviométrie, hydrométrie, niveau des nappes). Ces données, complétées par celles de nouveaux capteurs installés en 2002, seront utilisées pour la mise en œuvre et l'évaluation de la modélisation proposée sur un sous-bassin de l'Ouémé (sous-bassin de La Donga, 580 km²). Ce sous-bassin conserve une portion de végétation naturelle (forêt classée) et est fortement anthropisé.

Une première étape dans l'application de ce modèle est la description de la géométrie du système et de la surface. Un modèle numérique de terrain à 30 m est disponible et a déjà été utilisé pour proposer un premier découpage en REWs (Fig. 1 pour un découpage en 25 REWs). Deux images SPOT ont été acquises et classifiées conduisant essentiellement à une discrimination des zones de cultures et de forêt. L'application du modèle nécessite aussi une connaissance des propriétés hydrodynamiques des sols. Une campagne d'estimation de ces propriétés a été menée en Novembre 2000 à l'aide d'essais simplifiés d'infiltration (méthode Beerkan, Braud et al, 2001). Un maillage régulier de 2 minutes d'angle (66 points) a été réalisé couvrant l'ensemble du bassin. Une toposéquence avec un espacement de 20 m (43 points) a aussi été documentée afin de déterminer la variabilité de ces propriétés à petite échelle (Galle et al., 2001). Cette campagne n'a cependant fourni que des valeurs ponctuelles et le passage de ces valeurs ponctuelles à des valeurs caractéristiques sur les REWs demeure à investiguer.

La seconde étape consiste à déterminer les variables d'entrée du modèle (pluviométrie, climat). Une station synoptique est disponible à Parakou (une centaine de km du bassin), mais ne fournit que des données journalières. Une station météorologique complète sera installée en 2002 à Djougou (est du bassin) et fournira des données à 15 min. Un réseau de pluviographes avec une maille de 25 km a été installé, mais couvre encore assez mal le sous-bassin de la Donga. Une dizaine de stations supplémentaires sera installée en 2002 afin de mieux appréhender la variabilité spatiale de la pluie sur le bassin. Pour valider le modèle, on dispose du suivi d'une station limnimétrique à l'exutoire du bassin ainsi que de celui du niveau dans 17 puits. Cinq stations de mesure du débit supplémentaires seront installées en 2002 avec une volonté d'instrumenter des sous-bassins emboîtés et les différents types d'occupation des sols et/ou géologie pour disposer de moyens de valider les sorties intermédiaires du modèle sur différents REWs.

4. Discussion et conclusions.

La mise en œuvre et la validation d'un modèle comme POWER requièrent a priori une quantité importante de données. Une phase de calibration afin d'obtenir, essentiellement les propriétés hydrodynamiques à l'échelle des unités élémentaires, sera certainement nécessaire et la robustesse de cette dernière devra être étudiée avec soin.

Il sera aussi important de mener une étude de sensibilité complète du modèle à la disponibilité de l'information d'entrée (pluie, climat, description de la surface) afin de déterminer quelles sont les limites d'applicabilité de ce type de modélisation et jusqu'à quel niveau de finesse il est nécessaire de disposer des données d'entrée pour obtenir des résultats qui se distinguent de ceux d'un modèle plus simple. L'apport potentiel de la télédétection pour alimenter et valider ce type de modèle devra aussi être étudié.

Le concept de modélisation hydrologique proposé dans POWER apparaît prometteur. Il repose sur des bases théoriques solides et permet de proposer une voie intermédiaire entre les modèles conceptuels globaux et les modèles à base physique distribués. Une première évaluation a été réalisée par Reggiani et al. (2001b) sur un petit bassin versant en Belgique avec des résultats encourageants en terme de restitution des différentes composantes du cycle

hydrologiques (débit dans la rivière, piézométrie des nappes). Il reste maintenant à tester la pertinence de l'approche dans un contexte climatique tropical et une zone où le fonctionnement des nappes phréatiques et de leurs lien avec les écoulements dans les rivières reste encore mal connu.

Références:

- Braud, I., De Condappa, D., Soria, J., Galle, S., Haverkamp, R. and Vauclin, M., 2001. Scaled forms of the infiltration equation: application to the estimation of the unsaturated soil hydraulic properties, submitted to *European Journal of Soil Science*.
- 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 4th International Conference, Paris, France, 10-14 September 2001, p. 136.
- Reggiani, P., Sivapalan, M., Hassanizadeh, S.M., 1998. A unifying framework for watershed thermodynamics : balance equations for mass, momentum, energy and entropy, and the second law of thermodynamics. *Advances in Water Resources*, 22(4) : 367-598.
- Reggiani, P., Sivapalan, M., Hassanizadeh, S.M., Gray, W.G., 1999. A unifying framework for watershed thermodynamics : constitutive relationships. *Advances in Water Resources*, 23(1) : 15-39.
- Reggiani, P., Sivapalan, M., Hassanizadeh, S.M. 2000. Conservation equation governing hillslope response : exploring the physical basis of water balance, *Water Resour. Res.*, 36 (7) : 1845-1863.
- Reggiani, P., Sivapalan, M., Hassanizadeh, S.M., Gray, W.G, 2001a. Coupled equation for mass and momentum balance in a stream network : theoretical derivation and computational experiments. *Royal Society Proceedings A*, 457 (2005) : 157-189.
- Reggiani, P., de Neef, M.J., Rientjes, T.H.M. and Hassanizadeh, M., 2001b. Application of the Representative Elementary Watershed approach to a natural catchment, submitted.
- Ritchie, J.T., 1972. A model for predicting evapotranspiration from a row crop with incomplete cover, *Water Resour. Res.*, 8(5): 1204-1213.
- Soria, J.M., Reggiani, P., Angulo-Jaramillo, R., and Haverkamp, R., 2001. Aggregation of soils in presence of spatial changes in texture for representation of large scale watershed hydrological fluxes, International Association for Hydraulic Research Conference, Berkeley, USA, April 2002.

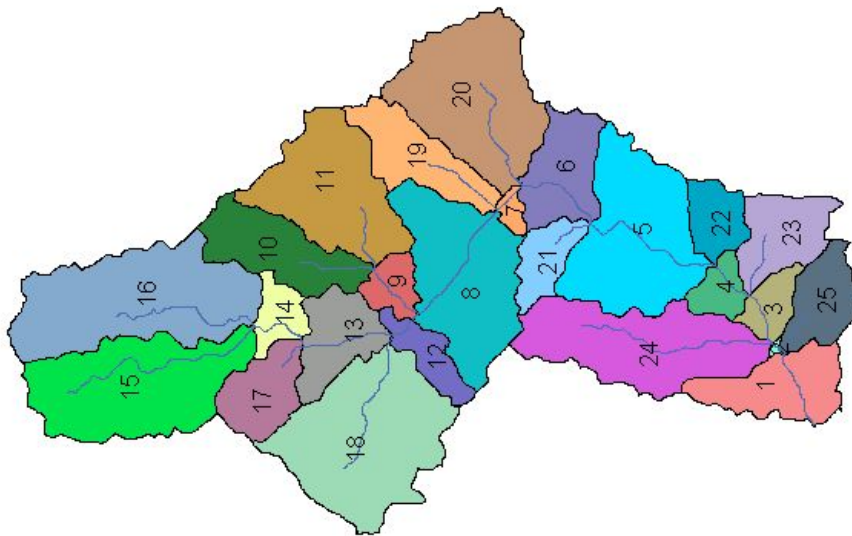


Figure 1: Découpage du sous-bassin versant de la Donga en 25 REWS. L'exutoire se trouve dans le REW n°1.