

## **Prise en compte de la végétation à l'aide de données NOAA AVHRR dans la modélisation pluie débit en Afrique de l'Ouest**

**ALAIN DEZETTER, FRANCOIS DELCLAUX,  
JULIEN LECONTE, ERIC SERVAT, GIL MAHE &  
JEAN-EMMANUEL PATUREL**

*IRD, UMR HydroSciences, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France  
alain.dezetter@msem.univ-montp2.fr*

**Résumé** Deux modèles pluie débit au pas de temps mensuel ont été utilisés pour simuler le fonctionnement de grands bassins versants ouest africains. Dans ces régions, l'évapotranspiration réelle (*ETR*), qui représente la majeure partie du bilan hydrique annuel, est calculée par comparaison d'un réservoir "sol" et d'une évapotranspiration potentielle (*ETP*). Pour caractériser plus précisément l'*ETR*, nous utilisons les données du capteur NOAA AVHRR. L'étude des corrélations entre les *ETR* calculées par les modèles hydrologiques et les données NDVI traduit la variabilité spatio-temporelle de la dynamique de la végétation sur cette région et conduit à une expression analytique de l'*ETR* du modèle de Yates. Par ailleurs, une estimation directe de l'*ETR* à l'aide des données AVHRR est mise en oeuvre et comparée aux sorties des modèles hydrologiques.

**Mots clefs** Afrique de l'Ouest; AVHRR; échelle régionale; évapotranspiration; modèle hydrologique; NDVI

**Key words** West Africa; AVHRR; regional scale; évapotranspiration; hydrological model; NDVI

### **INTRODUCTION**

Une modélisation régionale au pas de temps mensuel sur une grille d'un demi degré carré a été mise en oeuvre sur plusieurs bassins versants d'Afrique de l'Ouest. Deux modèles ont été utilisés: le modèle de Yates (1997) et le Water Balance Model (WBM) développé par Conway (1999). Or, dans ces régions, l'évapotranspiration (*ETR*) représente entre 50 et 80% du bilan hydrique annuel. La caractérisation spatiale des zones de végétation est donc nécessaire à la modélisation de la relation pluie-débit. Afin de diminuer l'incertitude sur l'estimation régionale de l'*ETR*, on se propose d'utiliser les informations satellitales du capteur NOAA AVHRR pour caractériser la dynamique de la végétation et les flux hydriques associés. En effet, l'historique des données disponibles sur Internet, la résolution spatio-temporelle des images et la gamme des canaux utilisés donnent accès à des informations brutes et élaborées susceptibles d'améliorer l'estimation et la modélisation de l'*ETR* aux échelles de temps et d'espace caractéristiques d'une modélisation régionale.

Cette étude a deux objectifs: (a) l'étude de la relation entre le NDVI et l'*ETR* issue du modèle de Yates afin de prendre en compte cette dernière dans la modélisation pluie débit et de caractériser analytiquement l'*ETR* à partir de données NDVI

disponibles; (b) la modélisation de l'*ETR* à partir de données satellitales AVHRR afin d'intégrer dans les modèles pluie débit une estimation directe du flux hydrique lié à l'évapotranspiration.

## DONNÉES

### Les modèles hydrologiques

Les deux modèles hydrologiques utilisés ici pour calculer l'*ETR* fonctionnent au pas de temps mensuel et au pas d'espace du  $\frac{1}{2}$  degré carré. Le modèle décrit par Yates (Yates, 1997) est un modèle de bilan qui représente les écoulements de surface et de sub-surface ainsi que l'évapotranspiration réelle par une fonction continue de l'humidité du sol (Fig. 1). L'équation du bilan avec ce modèle est de la forme suivante:

$$S_{\max} \frac{dz}{dt} = R_S(P, z, t) - R_{SS}(z, t) - E_r(ETP, z, t) \quad (1)$$

$$E_r(ETP, z, t) = ETP \left( \frac{5z - 2z^2}{3} \right) \quad (2)$$

$$R_S(P, z, t) = z^\varepsilon P \quad (3)$$

$$R_{SS}(z, t) = \alpha z^2 \quad (4)$$

où  $R_S$  est l'écoulement de surface,  $R_{SS}$  l'écoulement de sub-surface,  $E_r$  l'évapotranspiration réelle,  $S_{\max}$  la capacité maximale de stockage du sol (intégrant la zone racinaire et les couches de sol plus profondes) et  $z$  est le niveau relatif du stock d'eau (rapport entre le stock d'eau et  $S_{\max}$ ). L'écoulement total est obtenu en faisant la sommation de  $R_S$  et de  $R_{SS}$ . Le modèle comporte donc trois paramètres :  $\varepsilon$ ,  $\alpha$ , et  $S_{\max}$ . Yates (1997), en s'appuyant sur le schéma de classification climat-végétation de Holdridge, propose une prédétermination des paramètres basée sur une méthode purement empirique.

Le modèle WBM (Conway, 1999) simule les variations de l'humidité du sol, de l'évapotranspiration réelle et de l'écoulement en fonction des précipitations ( $P$ ), de l'évapotranspiration potentielle ( $ETP$ ) et des caractéristiques du sol (Fig. 2). Les

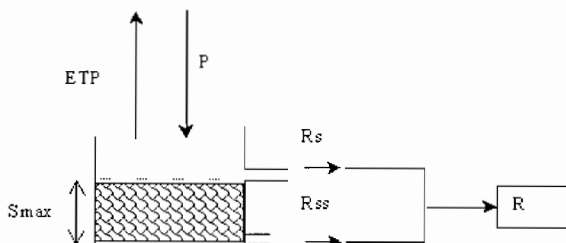


Fig. 1 Schéma conceptuel du modèle de Yates.

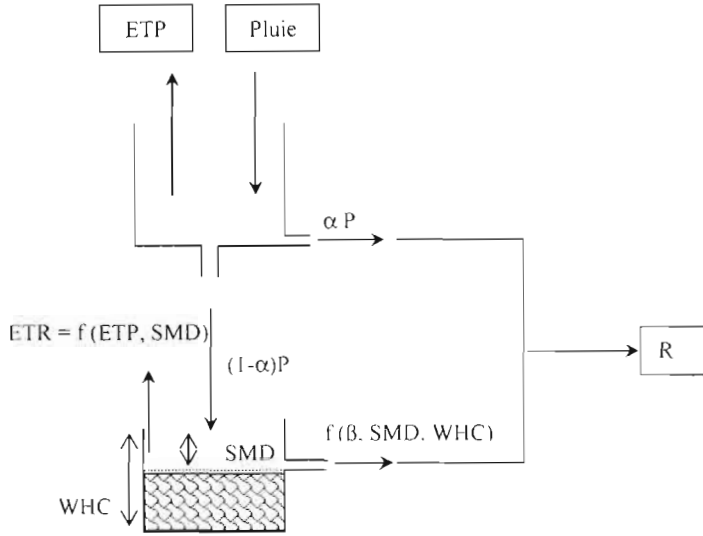


Fig. 2 Schéma conceptuel du modèle WBM (Conway, 1999).

variables d'état sont définies par les interactions entre les précipitations, l'ETP et le stock d'humidité du sol. Une proportion  $\alpha$  de la pluie se transforme en écoulement direct. Pour que l'écoulement ( $R$ ) se produise, il faut que la pluie excède l'ETP et satisfasse le déficit d'humidité du sol ( $SMD$ ). Le surplus s'ajoute alors au stock d'eau du mois précédent pour constituer l'eau potentiellement disponible du mois considéré. L'écoulement lent est une proportion  $\beta$  de cette eau disponible. Ce modèle comporte deux paramètres  $\alpha$  et  $\beta$ , qui doivent être calés et validés pour un bassin versant donné.

Deux zones géographiques sont représentées sur la Fig. 3. La plus large correspond à la zone sur laquelle nous avons utilisé le modèle de Yates. Pour la plus restreinte, le bassin versant du Nakambé, nous avons pu utiliser les deux modèles (WBM et Yates).

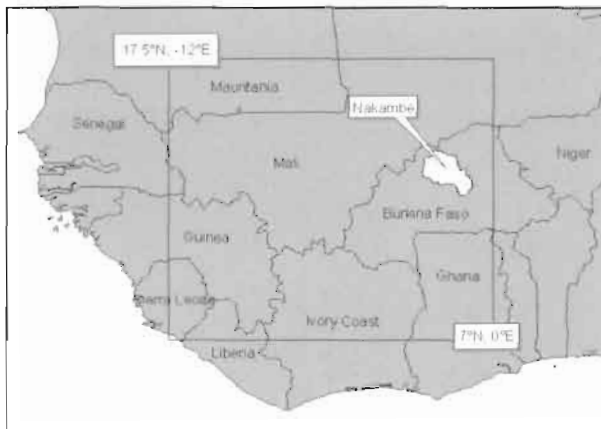


Fig. 3 Zones géographiques concernées.

## Les données NOAA AVHRR

Les capteurs AVHRR sont des radiomètres opérant dans les canaux rouge visible, proche infrarouge, infrarouge et infrarouge thermique. Les données de ces capteurs constituent une source quasi-ininterrompue d'informations depuis 1982 et sont diffusées par les centres d'archivage après correction et homogénéisation des valeurs radiométriques. Nous avons récupéré auprès du GSFC (Goddard Space Flight Center) les données des canaux 1, 2, 4, 5 depuis 1982 à un pas de temps décadaire et à une résolution de  $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ . Ces données sont bien adaptées au suivi de la végétation car la chlorophylle active est caractérisée par une forte absorption du rayonnement rouge visible et par une forte réflectance dans le proche infrarouge. Ainsi le GSFC diffuse-t-il également un index de végétation, le NDVI, élaboré à partir des canaux 1 et 2:

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{VIS}) / (\text{PIR} + \text{VIS}) \quad (5)$$

où PIR est la réflectance dans le proche infrarouge (canal 2:  $0.725$  à  $1.05 \mu\text{m}$ ) et VIS la réflectance dans le visible rouge (canal 1:  $0.58$  à  $0.68 \mu\text{m}$ ).

Le NDVI est l'indice de végétation le plus fréquemment utilisé. Il élimine en partie les variations simultanées d'éclairement dans les deux bandes dues aux hétérogénéités du paysage ou aux conditions de prise de vue différentes. Cependant la nature asymptotique de la relation limite son emploi aux couverts peu denses. Les valeurs du NDVI varient théoriquement entre  $-1$  et  $+1$ , mais la plupart des surfaces terrestres ont une valeur de PIR proche ou supérieure à celle de VIS. On rencontre donc le plus souvent des valeurs de NDVI proches de zéro (eau, sols nus et surfaces brûlées) ou supérieures (végétation plus ou moins dense et active). Hiernaux et Justice (1986) donnent comme seuil d'une présence de végétation la valeur de NDVI de  $0.05$  dans le Sahel malien.

## MÉTHODES

### Comparaison *ETR*-NDVI

Dans un premier temps, la comparaison *ETR*-NDVI a été étudiée sur la base de chronologies mensuelles de 1982 à 1992 sur une grille de  $0.5 \times 0.5$  de la fenêtre géographique  $[7^\circ\text{N}-0^\circ\text{E}] \times [17.5^\circ\text{N}-12^\circ\text{E}]$  (Fig. 3). L'*ETR* est estimée à cette résolution par le modèle de Yates. La méthode retenue pour l'agrégation du NDVI est une simple moyenne spatio-temporelle car c'est celle qui préserve le mieux la dynamique et les valeurs originales de l'indice.

### Estimation directe de l'*ETR* par les données AVHRR

Différentes méthodes permettent d'estimer l'évapotranspiration. Les modèles SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer) sont basés sur les mécanismes de transfert radiatif et turbulent et sur la dynamique physiologique des plantes. Ils ne sont

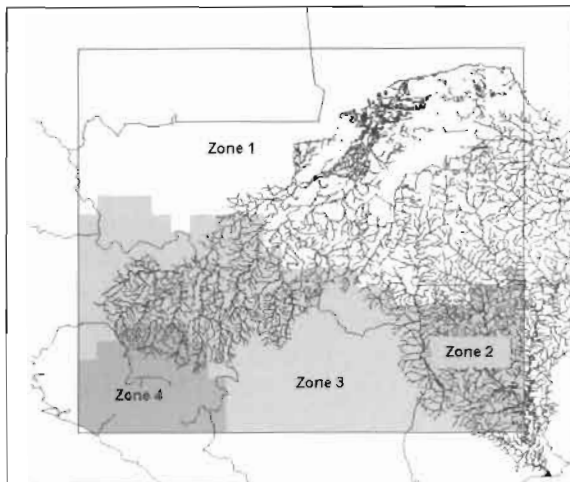


Fig. 4 Zones de comportement homogène de la relation *ETR* Yates – *NDVI*.

cependant pas adaptés aux échelles régionales. Les modèles du type Ritchie (Ritchie, 1972) décomposent l’*ETR* journalière en transpiration du couvert végétal, fonction de l’*ETP* et d’un indice foliaire, et en évaporation directe du sol. Or cette dernière nécessite une série d’équations empiriques et de données caractéristiques du sol et du climat. Nous nous sommes donc orientés vers l’approche énergétique qui relie le bilan hydrique au bilan d’énergie. En considérant qu’à l’échelle de la journée le terme de conduction dans le sol s’annule, l’*ETR* s’exprime par la relation simplifiée suivante (Amram, 1996):

$$ETR = R_n + A - B (T_s - T_a)^{\gamma} \tag{6}$$

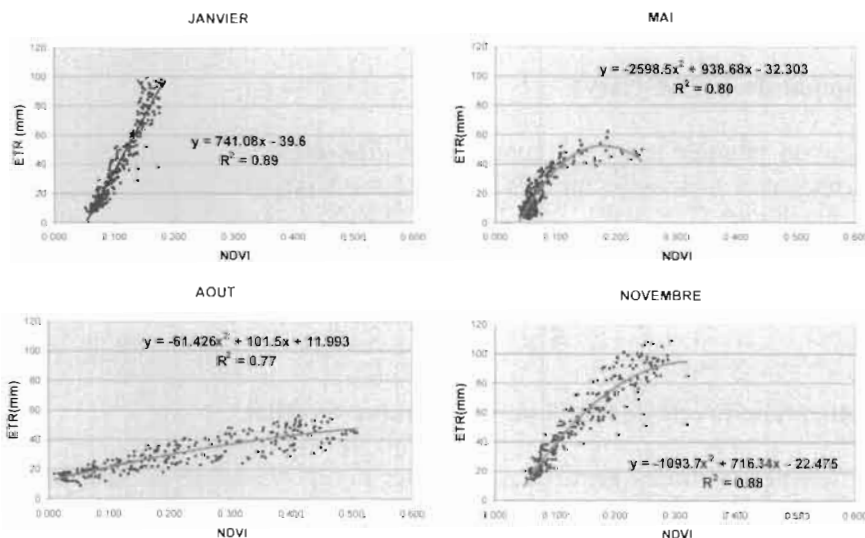


Fig. 5 Relations *ETR* Yates – *NDVI* sur la zone 1.

où  $A$ ,  $B$  et  $p$  sont des coefficients empiriques prenant en compte rugosité et vitesse du vent,  $T_s$  et  $T_a$  sont les températures du sol et de l'air à 14 h et  $R_n$  le rayonnement net. Kerr *et al.* (1992) estiment  $T_s$  comme une combinaison de températures de sol nu  $T_{bs}$  et de végétation  $T_v$  proportionnellement au taux de couverture  $C$ :

$$C = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}) / (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}) \quad (7)$$

$T_{bs}$  et  $T_v$  sont des combinaisons linéaires des canaux 4 et 5.

## RÉSULTATS

### Comparaison ETR-NDVI

Afin d'avoir un nombre de valeurs suffisamment grand pour être représentatif, cette comparaison a été effectuée à l'aide du modèle de Yates, applicable sur la zone géographique la plus large. Quatre zones de comportement homogène ont été identifiées (Fig. 4) par le tracé des diagrammes mensuels ETR NDVI. Nous nous sommes intéressés uniquement à la zone 1, dans laquelle figure le bassin versant du Nakambé. Les relations mensuelles entre la valeur du NDVI et l'ETR calculée par le modèle de Yates sont de bonne qualité ( $r^2$  entre 0.77 et 0.89), avec des formes différentes selon la saison considérée (Fig. 5). Les mois de transitions (Mai et novembre) ont des relations moins linéaires car la végétation n'est pas installée sur toute la zone de la même façon. Les relations sont calculées sur l'ensemble de la zone 1 et sur la période 1982–1992. Il existe donc une bonne corrélation entre le NDVI mensuel agrégé au  $\frac{1}{2}$  degré carré et la valeur d'ETR calculée par le modèle de Yates.

### Estimation directe de l'ETR par les données AVHRR

L'estimation directe de l'ETR a été faite à l'aide de la relation simplifiée (équation (6)) sur le bassin versant du Nakambé pour la période 1982–1992. La Fig. 6 regroupe

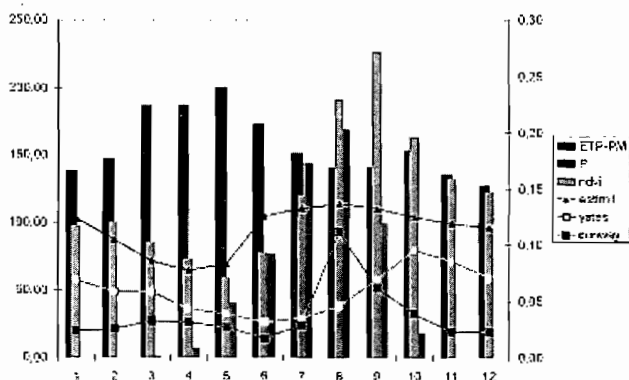


Fig. 6 Composantes du bilan hydrologique sur le bassin versant du Nakambé – médianes sur la période 1982–1992.

l'ensemble des informations de bilan disponibles pour ce bassin versant. On a représenté la médiane des valeurs mensuelles sur la période. On peut noter des différences importantes de comportement entre la méthode d'estimation directe et les valeurs calculées par les modèles hydrologiques. La méthode d'estimation suit plus directement le développement de la végétation alors que les modèles hydrologiques basés sur le fonctionnement d'un réservoir sol ont plus de temps de latence au démarrage et terminent la saison différemment selon le modèle. Un point important est facilement notable sur ce graphique, il s'agit de la décorrélation entre la demande climatique (ETP) et la végétation (NDVI) source d'évapotranspiration.

## CONCLUSION

Le suivi de la végétation à l'aide un indice de végétation standardisé (NDVI) est important pour tenir compte de son rôle dans le bilan hydrologique mensuel des grands bassins versants ouest africains. La simple corrélation entre cet indice et une variable interne des modèles hydrologiques n'est pas suffisante pour améliorer leur fonctionnement. Il semble nécessaire d'utiliser également des méthodes d'estimation directe de l'*ETR* afin d'améliorer le calcul des bilans, notamment au démarrage de la saison des pluies.

**Remerciements** Les auteurs remercient M. Ouedraogo pour la fourniture des données d'*ETR* issues des modèles et l'UMR Hydrosociétés pour la participation financière au projet.

## REFERENCES

- Amram, O. (1996) Régionalisation du bilan hydrique à l'aide de mesures satellitaires pour l'étude du fonctionnement des écosystèmes d'Afrique de l'Ouest. Thèse de l'université Paul Sabatier Toulouse, France.
- Conway, D. & Jones, P. (1999) Assessing the impact of future climatic change on the water resources and the hydrology of the Rio de la Plata basin, Argentina. Final Report, August 1999. Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK.
- Hiernaux, P. H. Y. & Justice, C. O. (1986) Monitoring the grassland of semi-arid Africa using NOAA-AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* 7(11).
- Kerr, Y., Lagouarde, J. P. & Imbernon, J. (1992) Accurate land surface temperature retrieval from NOAA-AVHRR data: use of an improved Split Window algorithm. *Remote Sens. Environ.* 41.
- Ritchie, J. T. (1972) Model for predicting Evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8(5), 1204–1213.
- Yates, D. N. (1997) Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *J Hydrol.* 201, 289–310.

IAHS Publication no. 278  
ISSN 0144-7815



# Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions

*Edited by*

*Eric Servat, Wajdi Najem, Christian Leduc  
& Ahmed Shakeel*







# Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions

Edited by

**ERIC SERVAT**

*IRD, UMR HydroSciences Montpellier (CNRS, UM2, IRD, UMI), Maison des Sciences de l'Eau, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France*

**WAJDI NAJEM**

*ESIB, Faculté d'Ingénierie de l'Université Saint-Joseph, BP 1514, Beyrouth, Liban*

**CHRISTIAN LEDUC**

*IRD, UMR HydroSciences Montpellier (CNRS, UM2, IRD, UMI), Maison des Sciences de l'Eau, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France*

**AHMED SHAKEEL**

*Indo-French Centre for Groundwater Research, National Geophysical Research Institute, Uppal Road, Hyderabad 500 007, India*

Papers selected for the international conference on:

**Hydrology of the Mediterranean and Semi-Arid Regions**

held in Montpellier, France, from 1 to 4 April 2003.

This conference was jointly convened by:

UNESCO (United Nations Educational and Cultural Organization)

IAHS (International Association of Hydrological Sciences)

WMO (World Meteorological Organization)

FRIEND AMHY (Flow Regimes from International Experimental and Network Data, Alpine and Mediterranean Region)

IFR ILEE (Institut Fédératif de Recherche, Institut Languedocien de Recherche sur l'Eau et l'Environnement)

**Published by the International Association of  
Hydrological Sciences 2003**

IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford,  
Oxfordshire OX10 8BB, UK

**IAHS Publication no. 278**

**ISBN 1-901502-12-0**

British Library Cataloguing-in-Publication Data.

A catalogue record for this book is available from the British Library.

© IAHS Press 2003

This publication may be reproduced as hard copy, in whole or in part, for educational or nonprofit uses, without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. As a courtesy the authors should be informed of any use made of their work. No use of this publication may be made for electronic publishing, resale or other commercial purposes without the prior written permission of IAHS Press.

The papers included in this volume have been peer reviewed and some were extensively revised before publication.

**IAHS is indebted to the employers of the Editors for the invaluable support and services provided that enabled them to carry out their task effectively and efficiently.**

The designations employed and the presentation of material throughout the publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of IAHS concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The use of trade, firm, or corporate names in the publication is for the information and convenience of the reader. Such use does not constitute an official endorsement or approval by IAHS of any product or service to the exclusion of others that may be suitable.

The papers were checked, formatted and assembled by Cate Gardner and Penny Farnell at IAHS Press, Wallingford, UK.

Publications in the series of Proceedings and Reports are available *only* from:  
**IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford,  
Oxfordshire OX10 8BB, UK**

tel.: +44 1491 692442; fax: +44 1491 692448; e-mail: [jilly@iahs.demon.co.uk](mailto:jilly@iahs.demon.co.uk)