

Utilisation de modèles hydrologiques pour évaluer les ressources en eau de surface et leur évolution spatio-temporelle—application à l’Afrique de l’Ouest

**JEAN-EMMANUEL PATUREL, MAHAMAN OUEDRAOGO,
GIL MAHE**

*IRD, UMR HydroSciences Montpellier (IRD-UM2-UMI-CNRS) et IRD, 01 BP 182,
Ouagadougou 01, Burkina Faso*

ERIC SERVAT, ALAIN DEZETTER

*IRD, UMR HydroSciences Montpellier (IRD-UM2-UMI-CNRS), BP 64501,
F-34394 Montpellier Cedex 5, France
eric.servat@msem.univ-montp2.fr*

Résumé Cette étude couple trois modèles hydrologiques (GR2M, Water Balance Model modifié et Yates) à un Système d’Information Géographique, afin d’analyser l’impact de la péjoration climatique observée en Afrique de l’Ouest sur la ressource en eau de surface à un pas d’espace de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ et à un pas de temps mensuel. Les modèles de relation pluie-débit utilisés nécessitent des données peu nombreuses et assez facilement disponibles en Afrique mais permettent cependant d’atteindre des niveaux de performance satisfaisants. La transposition des résultats obtenus sur certains bassins versants se révèle difficile sur d’autres, non jaugés, et pour lesquels on ne dispose d’aucune information. Seul, le modèle de Yates permet de prédéterminer les valeurs de ses paramètres sans aucune procédure de calage et validation. La cartographie des lames d’eau écoulées rend possible de dresser une répartition spatiale des écoulements à l’échelle régionale et d’apprécier l’impact de la variabilité du climat sur les ressources en eau.

Mots clefs Afrique de l’Ouest; cartographie; hydrologie régionale; ressources en eau; SIG; variabilité climatique

Key words West Africa; mapping; regional hydrology; water resources; GIS; climate variability

INTRODUCTION

L’Hydrologie régionale a connu un essor important au plan international durant les dernières années. Par le canal de réseaux fédérateurs tels que les projets FRIEND de l’UNESCO, des chercheurs mettent en commun des données et des méthodologies d’études. De la sorte, l’hydrologie régionale, tout en mettant l’accent sur les particularités des méthodes, opère une synthèse d’informations qui vise à et permet de répondre aux besoins de ceux qui, gestionnaires de projet, d’aménagements, décideurs et autres, travaillent généralement à une grande échelle d’espace et un pas de temps mensuel qui sont celles de la mobilisation et de la planification en termes de ressources en eau. L’espace de travail que nous avons choisi est constitué d’une grille de mailles régulières de dimension $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

Le travail présenté ici couple trois modèles hydrologiques (GR2M, Water Balance Model modifié et Yates) à un Système d'Information Géographique (SIG), afin d'analyser l'impact de la péjoration climatique observée depuis plus de 30 ans en Afrique de l'Ouest sur ces lames d'eau écoulées et donc sur la ressource en eau disponible et mobilisable. Un travail préparatoire (Ouedraogo, 2001) a abouti à la sélection de ces trois modèles de relation pluie-débit simples et robustes nécessitant des données d'entrée peu nombreuses et assez facilement disponibles en Afrique: précipitation, évapotranspiration potentielle et des valeurs de capacité de rétention en eau des sols.

CHOIX DE LA TAILLE DES MAILLES ET DE LA MODELISATION RETENUE

La dimension de chaque maille utilisée pour l'étude est de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Ce choix d'une structure simple et régulière est un compromis entre la taille qui est exigée pour représenter la variabilité spatiale et celle pour laquelle on dispose de données convenables. Yates (1997) pense qu'une résolution inférieure ou égale à $1^\circ \times 1^\circ$ permet de représenter la variabilité spatiale à un niveau acceptable. Arnell & Reynards (1996) pensent qu'une grille de dimension supérieure à $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ conduirait à perdre la bonne qualité de représentation de la variabilité, et qu'une résolution plus fine nécessiterait une quantité énorme de données et des efforts considérables pour les calculs.

Les modèles pluie-débit fonctionnant à des pas de temps courts (horaire, journalier) auraient pu être employés dans le même but que les modèles mensuels. Mais ils requièrent des données d'entrée qui ne sont malheureusement pas toujours disponibles. En outre, ces algorithmes sont souvent d'une utilisation beaucoup plus complexe que ceux fonctionnant au pas de temps mensuel et sont généralement assez lourds à manipuler. Gleick (1986) montre que pour une étude à l'échelle régionale, un modèle fonctionnant au pas de temps mensuel est suffisant, tant en ce qui concerne la représentation des phénomènes que la précision de ses restitutions.

PROCESSUS DE FONCTIONNEMENT GENERAL DES MODELES CHOISIS

Trois modèles de bilan d'eau utilisés au pas de temps mensuel ont été retenus. Il s'agit:

- (a) d'une version modifiée (Conway & Jones, 1999) du Water Balance Model (WBM) initialement proposé et défini par Thornthwaite & Mather (1955);
- (b) du modèle GR2M du Cemagref (Makhlouf, 1994); et
- (c) du modèle de Yates (Yates, 1997).

Les modèles utilisent les mêmes données à savoir, la pluie, l'évapotranspiration potentielle, le débit et des données liées au stockage de l'eau dans le sol (capacité de rétention en eau du sol pour les modèles GR2M et WBM modifié; capacité maximale de stockage d'eau dans le sol pour le modèle de Yates).

Les modèles GR2M et WBM modifié comportent des paramètres dont les valeurs numériques sont obtenues après optimisation d'un critère de qualité des débits générés par ces modèles.

Les paramètres du modèle de Yates, quant à lui, sont reliés à des caractéristiques physiques du bassin et ne nécessitent aucune procédure d'optimisation.

Ces modèles présentent un mode de fonctionnement comparable, même si les équations qui les décrivent sont différentes. Nous résumons comme suit le mode de fonctionnement général commun à ces modèles:

- (a) une fraction de la pluie mensuelle participe à l'écoulement direct;
- (b) le niveau d'un réservoir qui représente le stock d'eau évolue en fonction de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle par l'intermédiaire d'une évapotranspiration réelle; et
- (c) une vidange progressive de ce stock d'eau produit l'écoulement lent.

LES PRINCIPES DE L'ÉVALUATION DE L'ÉCOULEMENT

La méthode consiste à estimer les lames d'eau mensuelles et annuelles sur chaque maille en fonction de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle en utilisant un des trois modèles de bilan hydrologique couplé à un SIG.

A l'aide de grilles de précipitations, d'évapotranspiration potentielle et de caractéristiques physiographiques disponibles, on simule les variations de l'humidité du sol, de l'évapotranspiration réelle et de l'écoulement. Celles-ci sont calculées pour chaque maille, indépendamment les unes des autres, et ce pour chaque pas de temps. On superpose à cette grille les contours des bassins versants. L'écoulement total à l'exutoire de chacun des bassins est obtenu par sommation des contributions élémentaires des différentes mailles qui les constituent. Lorsqu'une maille recoupe une limite de bassin versant, ce calcul sera pondéré par la superficie du bassin versant au sein de cette maille.

Une simplification est faite en n'intégrant aucune procédure de transfert dans le schéma de fonctionnement des modèles. Au regard du pas de temps mensuel et de la taille des mailles, cette procédure apparaît comme justifiée.

ZONE D'ÉTUDE ET DONNÉES

- (a) La zone d'étude, située en Afrique de l'Ouest, couvre entièrement ou partiellement les trois pays suivants : Burkina Faso, Mali et Côte d'Ivoire.
- (b) La grille de données pluviométriques utilisée a été calculée à partir des données CRU (Climatic Research Unit) de l'Université d'East Anglia (New *et al.*, 2000) auxquelles ont été ajoutées les données de près de deux cents postes supplémentaires provenant de la banque de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).
- (c) La grille d'ETP utilisée a été obtenue auprès du CRU pour la formulation d'estimation empirique de l'ETP inspirée de la méthode décrite par Thom & Oliver (1977).
- (d) La grille de capacité en eau du sol utilisée est extraite de la "Digitized Soil Map of the World" de la FAO (FAO-UNESCO, 1974–1981).

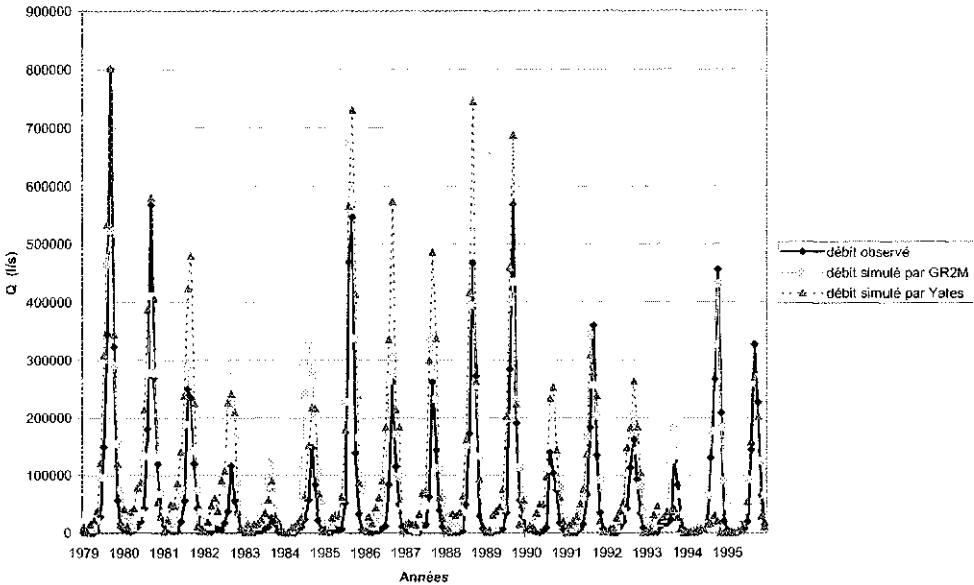


Fig. 1 Hydrogrammes simulés par les modèles GR2M et Yates à Bada sur le Bandama.

CHOIX DU MODELE

Les modèles GR2M et Water Balance Model ne permettent d'établir une cartographie des lames d'eau que pour les bassins sur lesquels ils ont été calés et validés.

Le modèle de Yates permet d'aboutir à une carte des lames d'eau écoulées sur l'ensemble de la zone d'étude étant donné que les paramètres de ce modèle peuvent être prédéterminés.

La comparaison des meilleures reconstitutions des hydrogrammes observés obtenues avec les modèles GR2M et Yates sur quelques bassins tests montrent une bonne concordance entre les deux modèles. La Fig. 1 illustre, par exemple, les hydrogrammes simulés par les modèles GR2M et Yates sur le bassin du Bandama à Bada.

Pour être en mesure de cartographier les lames d'eau écoulées en utilisant les modèles GR2M ou WBM modifié, il faut pouvoir régionaliser les paramètres obtenus. Or, le report sur une carte des valeurs des paramètres calés pour chacun de ces modèles ne semble pas laisser apparaître une organisation spatiale structurée, comme le montre l'exemple de Fig. 2. Aussi avons-nous décidé de ne retenir que le modèle de Yates dans le cadre de cette approche particulière.

CARTOGRAPHIE DE LA MOYENNE ANNUELLE DES LAMES D'EAU ECOULEES

La représentation cartographique des lames d'eau moyennes annuelles est illustrée sur la Fig. 3 à partir d'un découpage en mailles régulières de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. La période de référence sur laquelle les moyennes ont été calculées est la période 1950–1995.

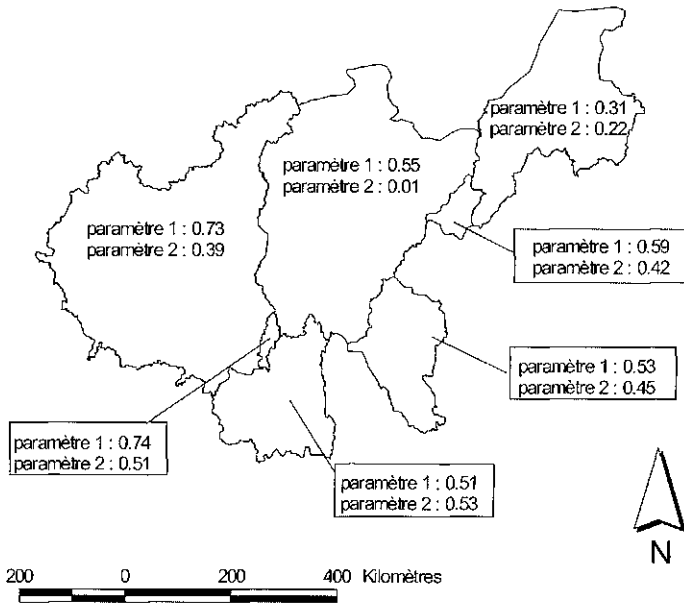


Fig. 2 Carte des paramètres optimisés du modèle GR2M sur des bassins-tests (Bada, Boromo, Douna, Iradowou, Koulikoro, Samandeni, Semien).

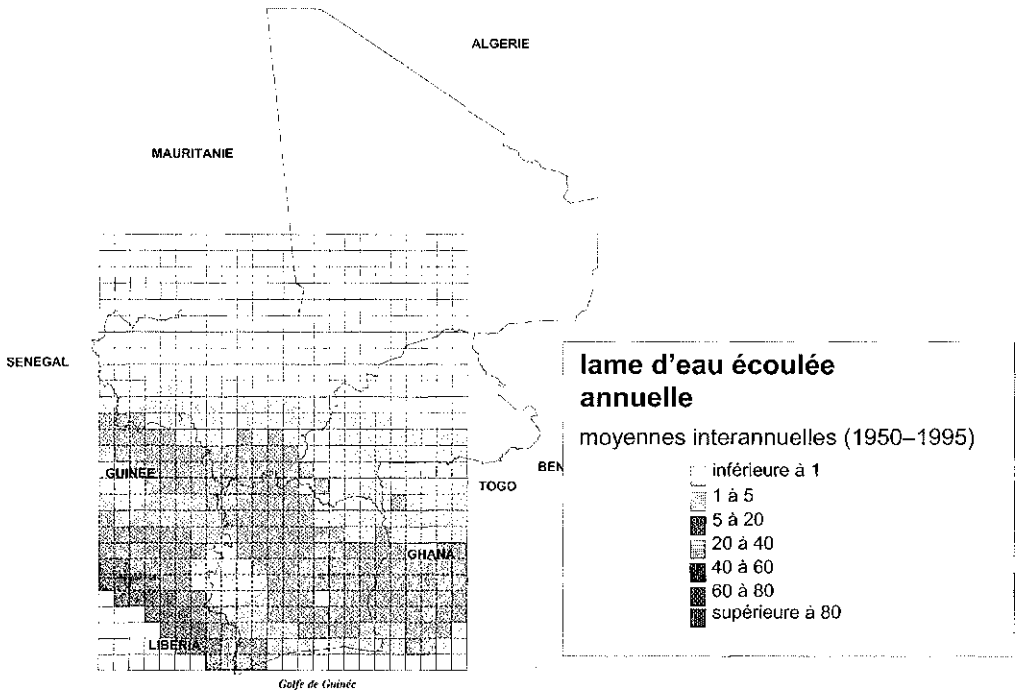


Fig. 3 Moyenne annuelle des lames d'eau écoulées sur la période 1950–1995.

La lame d'eau écoulée est une variable au contenu synthétique puisqu'elle intègre, selon le bilan hydrologique qui permet son évaluation, plusieurs paramètres climatiques. Il ne semble donc pas surprenant que les cartes obtenues fassent ressortir une décroissance générale de la lame d'eau écoulée annuelle du nord au sud. Les zones les plus septentrionales, situées aux confins du désert saharien, et la zone sahélienne se distinguent par de faibles valeurs de lames d'eau écoulées annuellement. La carte indique des lames d'eau annuelles inférieures à 1 mm sur toute la bande comprise entre les latitudes 14°N et 18°N.

Progressivement la lame d'eau écoulée annuelle augmente vers le sud en prenant des valeurs comprises entre 5 et 80 mm. Quelques distorsions s'observent par endroits, et semblent être dues aux effets du relief. La dorsale guinéenne s'individualise avec les plus fortes valeurs de lame d'eau écoulées.

La moyenne annuelle des lames d'eau écoulée sur la période 1971–1995 est représentée sur la Fig. 4. La configuration générale de la répartition spatiale des lames d'eau écoulées est similaire à celle décrite ci-dessus. Cependant, les valeurs de lames d'eau écoulées sont plus faibles que celles calculées sur l'ensemble de la période 1950–1995. Un léger glissement des valeurs calculées s'opère donc vers le sud, en accord avec ce qui a été observé par ailleurs (Paturel *et al.*, 1997; Servat *et al.*, 1997, 1999).

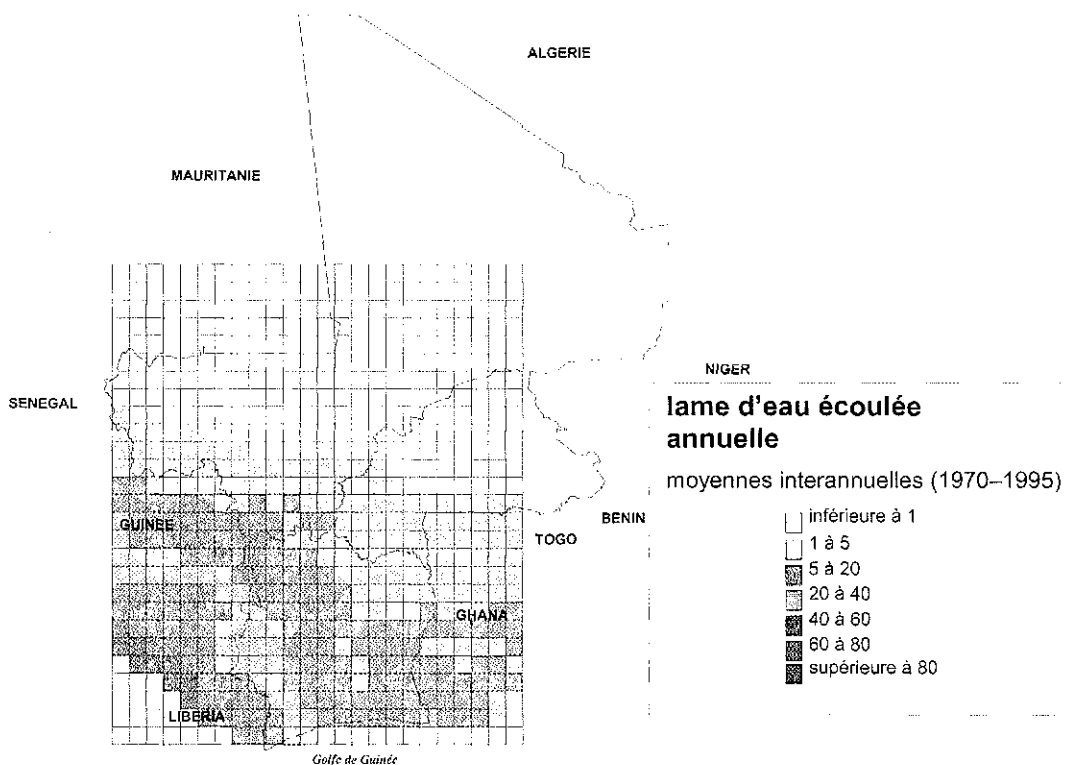


Fig. 4 Moyenne annuelle des lames d'eau écoulées sur la période 1970–1995.

CONCLUSION

Cette étude s'intègre dans un programme de recherche plus vaste, développé à l'IRD, qui a pour but d'analyser l'impact de la péjoration climatique, observée depuis plus de 30 ans en Afrique de l'Ouest et Centrale, et des activités anthropiques sur les ressources en eau de surface (Servat, 2000). Elle présente la faisabilité du couplage de modèles hydrologiques à un système d'information géographique, et son application à la spatialisation de lames d'eau écoulées à une échelle mensuelle ou annuelle.

L'emploi de modèles simples de bilan hydrologique permet d'atteindre des niveaux de performance satisfaisants. La limite actuelle affichée par des modèles type GR2M ou Water Balance Model est que les résultats obtenus sur des bassins tests ne peuvent pas être transférés à d'autres bassins pour lesquels on ne dispose d'aucune information: aucune organisation spatiale simple des paramètres de ces modèles ne semble évidente. Le modèle de Yates, malgré son aspect empirique, permet de pallier ce problème de régionalisation.

La cartographie des lames d'eau écoulées annuelles calculées à l'aide du modèle de Yates sur les périodes 1950–1995 et 1971–1995 nous a permis d'une part de dresser une répartition spatiale des écoulements à l'échelle régionale et, d'autre part, d'apprécier les manifestations de la variabilité du climat sur les ressources en eau.

L'approche utilisée dans cette étude présente plusieurs avantages liés à la simplicité et à la souplesse qu'offre le couplage de modèles hydrologiques aux SIG. Les résultats sont prometteurs. Il reste cependant encore de nombreux axes à explorer pour renforcer les acquis et cette approche peut encore être efficacement développée.

REFERENCES

- Arnell, N. W. & Reynards, N. S. (1996) The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *J. Hydrol.* **183**, 397–424.
- Conway, D. & Jones, P. D. (1999) Assessing the impact of future climatic change on the water resources and the hydrology of the Rio de la Plata basin, Argentina. Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK.
- FAO-UNESCO (1974–1981) *Digitized Soil Map of the World*. FAO, Rome, Italy.
- Gleick, P. H. (1986) Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *J. Hydrol.* **88**, 97–116.
- Makhlouf, Z. (1994) Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, France.
- New, M. G., Hulme, M. & Jones, P. D. (2000) Representing 20th century space-time climate variability. II: Development of 1901–1996 monthly terrestrial climate fields. *J. Climate* **13**, 2217–2238.
- Ouedraogo, M. (2001) Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest—Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc (Montpellier II), France.
- Paturel, J. E., Servat, E., Kouamé, B., Lubès, H., Ouedraogo, M. & Masson, J. M. (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part two: An integrated regional approach. *J. Hydrol.* **191**, 16–36.
- Servat, E. (2000) Analyse de la Variabilité Hydrologique et Impacts sur les Ressources en Eau - Projet VAHYNE. Document interne, IRD Montpellier, France.
- Servat, E., Paturel, J. E., Lubès, H., Kouamé, B., Ouedraogo, M. & Masson, J. M. (1997) Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part one: Detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *J. Hydrol.* **191**, 1–15.
- Servat, E., Paturel, J. E., Lubès-Niel, H., Kouamé, B., Masson, J. M., Travaglio, M. & Mariou, B. (1999) De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Rev. Sci. Eau* **12**(2), 363–388.
- Thom, A. S. & Oliver, H. R. (1977) On Penman's equation for estimating regional evapotranspiration. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **103**, 345–357.
- Thornthwaite, C. W. & Mather, J. R. (1955) The water balance. *Publ. Climatol. Lab. Climatol. Drexel Inst. Technol.* **8**(1), 1–104.
- Yates, D. N. (1997) Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *J. Hydrol.* **201**, 289–310.