

## Modélisation hydrologique et regionalisation en Afrique de l'Ouest et centrale

J. E. PATUREL<sup>1</sup>, E. SERVAT<sup>1</sup>, A. DEZETTER<sup>1</sup>, J. F. BOYER<sup>1</sup>,  
C. LAROCHE<sup>2</sup>, L. MOUNIROU<sup>2</sup>, H. LUBES-NIEL<sup>1</sup> & G. MAHE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMII, HydroSciences Montpellier, case MSE, Place E. Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France

[paturel@msem.univ-montp2.fr](mailto:paturel@msem.univ-montp2.fr)

<sup>2</sup> Groupe EIER-ETSHER, BP 594, Ouagadougou 01, Burkina Faso

**Résumé** L'économie des pays en développement dépend fortement de la ressource en eau. Pour mieux la planifier et mieux la gérer, il faut mieux la connaître dans sa dimension spatiale et dans sa dimension temporelle. Depuis près de 20 ans, l'évaluation des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale constitue la finalité des travaux menés par HydroSciences Montpellier. Certains facteurs conditionnent les objets de nos études et les outils employés: le manque de données disponibles impose d'utiliser des modèles pluie—débit peu gourmands en données et des outils d'analyse robustes; les plans de développement de ces régions s'appuient sur des analyses à grand pas de temps et d'espace; le contexte de changement climatique observé depuis 1970 n'a pas touché de la même façon toutes les régions. Ce papier dresse quelques résultats de travaux, utilisant des outils ou des méthodes développés à HydroSciences, et des perspectives liés à la régionalisation en Hydrologie.

**Mots clefs** Afrique de l'Ouest; bassins non jaugés; changement climatique; grands échantillons de données; modélisation Pluie – Débit; régionalisation

## Hydrological modelling and regionalization in West and Central Africa

**Abstract** The economy of developing countries strongly depends on water resources. For a better management of water resources, we need to know better its spatio-temporal variability. For the last 20 years water resources assessment in Western and Central Africa has been the main research field of the HydroSciences Montpellier (HSM) laboratory. There are three main external constraints to our studies: the lack of available data which drives our choice for rainfall–runoff models using only few input data and robust analysis tools; the large time and space scales which are those used by development plans; and the climate changes since 1970 which have had impacts of various magnitude and spatial scale across the region. This paper summarizes some results using tools and methods developed at the HSM Laboratory, and draws some perspectives of research in the field of regionalization in hydrology.

**Key words** West Africa; ungauged basins; climatic change; large sample data; rainfall – runoff model; regionalization

## INTRODUCTION

Depuis près de 20 ans, l'évaluation des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale constitue la finalité des travaux menés par l'équipe VAHYNE d'Hydro-

Sciences Montpellier. Pour se placer du point de vue de l'aménageur et du gestionnaire, on travaille à partir de données disponibles auprès des services nationaux, gestionnaires des réseaux de mesure. Les modèles pluie-débit alors utilisés doivent être peu "gourmands" en données et très robustes, pour tenir compte de la qualité et de la densité des points de mesures. Notre choix s'est donc porté sur des modèles conceptuels globaux. Les pas d'espace balayés vont de quelques dizaines de kilomètres carrés à quelques dizaines de milliers de kilomètres carrés. Quant au pas de temps, il a été journalier et est devenu, depuis quelques années, mensuel.

Après avoir décrit le type de modèles utilisés, la banque de données mise en place et le contexte hydroclimatique de la région étudiée, ce papier présente des résultats de travaux liés à la régionalisation (essayer d'établir des lois à une échelle régionale permettant de déterminer les valeurs des paramètres pour des bassins non jaugés en exploitant les informations sur des sites jaugés voisins sur lesquels on peut caler le modèle) et utilisant des outils ou des méthodes développés à HydroSciences:

- une analyse de l'évolution de la relation Pluie-Débit au pas de temps mensuel (GR2) sur ces régions en relation avec le changement climatique observé,
- les résultats d'une première tentative de prédétermination des paramètres d'un modèle journalier (GR3) à partir de données liées aux données pluviométriques de la station considérée et à la géographie et à l'occupation du sol du bassin versant,
- une analyse de l'information nécessaire minimale pour caler correctement un modèle mensuel (GR2).

Quelques perspectives envisagées de recherche closent cet article.

## **CHOIX DES MODELES PLUIE-DEBIT**

Comme l'ont déjà écrit Edijatno *et al.* (1999), "notre ambition est d'arriver à une simulation pas trop décevante en utilisant une représentation la plus simple possible du processus pluie-débit, dépendante d'un très faible nombre de paramètres, qu'il restera à caler pour s'adapter à la rivière que l'on veut étudier". *A priori*, on se place du point de vue de l'aménageur et du gestionnaire; on travaille à partir de données disponibles auprès des services nationaux gestionnaires des réseaux de mesure. Les modèles pluie-débit alors utilisés doivent être peu "gourmands" en données et très robustes pour tenir compte de la qualité et de la densité des points de mesures. Notre choix s'est donc porté sur des modèles conceptuels. Les pas d'espace balayés vont de quelques dizaines de kilomètres carrés à quelques dizaines de milliers de kilomètres carrés. Quant au pas de temps, il est journalier ou mensuel. Nous avons travaillé à partir de deux versions des modèles Génie Rural (GR):

- une version journalière (GR3J) développée par Edijatno & Michel (1989),
- une version mensuelle (GR2M) développée par Makhoulouf (1994). que nous avons adaptée à notre contexte climatique et scientifique (Ouedraogo, 2001; Ardoin, 2004).

Nous renvoyons à ces auteurs pour une description complète des modèles utilisés.

## **PRESENTATION DE LA BASE DE DONNEES ET DU CONTEXTE CLIMATIQUE**

Un “Système d’Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation” (SIEREM, Boyer, 2003; Boyer *et al.*, 2004) a été mis en place ([www.hydrosciences.fr/SIEREM](http://www.hydrosciences.fr/SIEREM)) pour les besoins de recherche de l’équipe HSM et regroupe des données chronologiques (séries hydroclimatiques rattachées à une station de mesure) et des données spatiales (caractérisant le milieu physique).

Les données hydro-climatiques proviennent de plusieurs sources: programmes de recherche où des compléments de données ont pu être faits, questionnaires nationaux ou institutionnels de bases de données hydrologiques. Profitant de notre connaissance du milieu africain, nous avons extrait ce que nous avons considéré comme la source la plus fiable et comblé ses lacunes par les autres sources potentielles. Nous avons pu ainsi rassembler plus de:

- 27 500 stations-années de données météorologiques (autres que données pluviométriques),
- 70 000 stations-années de données pluviométriques,
- 20 000 stations-années de données hydrométriques,
- à des pas de temps généralement journaliers ou mensuels.

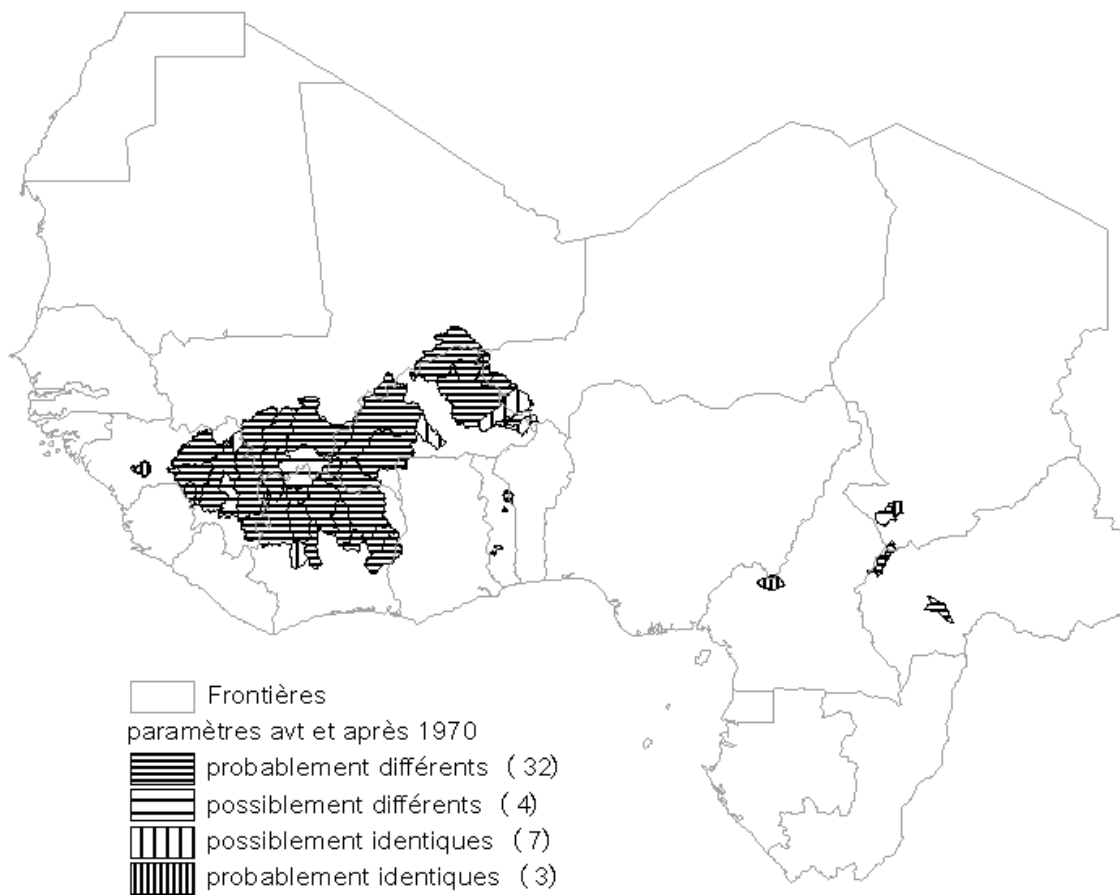
Les informations sur le milieu physique sont issues de cartes thématiques (géologie, pédologie, couverture végétale, ...) qui ont été numérisées par nos soins. A partir de développements avec des SIG et MNT, il est possible de disposer pour chacun des bassins versants de la base (plus de 350 bassins) d’une “donnée Sol” issue du CD-Rom, Digital Soil Map of the World (FAO-UNESCO, 1974–1981). La FAO a proposé une classification des sols à laquelle sont associées des classes de capacité de rétention en eau. Cette donnée nous est utile dans le cadre de la modélisation.

Le traitement d’une partie de ces informations nous a permis de mettre en évidence le phénomène climatique, aujourd’hui, bien connu: autour de 1970, un changement climatique a été observé qui se traduit par des modifications au sein des chroniques de pluies et de débits (et donc de coefficients d’écoulement) (Servat *et al.*, 1998).

## **ANALYSE DE L’EVOLUTION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT ET CONSEQUENCES SUR LES TRAVAUX LIES A LA MODELISATION ET A LA REGIONALISATION**

Le contexte hydroclimatique précédemment décrit nous a permis de distinguer, en général, 2 périodes, de part et d’autre de 1970. Sur chacune de ces périodes, les modèles ont été calés et les modifications éventuelles de leurs paramètres obtenus par la construction de régions de confiance autour du jeu optimum de paramètres ajusté ont été étudiées. Nous renvoyons à Lubès-Niel *et al.* (2003) pour le détail des méthodes de construction des régions de confiance et d’analyse.

La Fig. 1 montre les résultats obtenus pour un des paramètres du modèle GR2M. Il apparaît bien que les couples de paramètres optimisés sont différents de part et d’autre des années 1970, même si, en fonction des chevauchements possibles des régions de confiance, divers degrés de signification des changements sont possibles. La relation



**Fig. 1** Comparaison des valeurs d'un paramètre de GR2M obtenues par calage avant et après 1970 (d'après Dufresne, 2004).

**Tableau 1** évolution des coefficients d'écoulement sur quelques bassins du Burkina Faso et du Niger (d'après Mahé *et al.*, 2005).

Rivière	Station	Système	Surface km <sup>2</sup>	Coeff. d'écoul. avant 1972 %	Coeff. d'écoul. après.1972 %	Ratio après./avant 1972 %
Nakambe	Wayen	Volta	20800	1.4	2.9	+ 108
Gorouol	Alcongui	Niger	44850	1.6	2.2	+ 40
Gorouol	Koriziena	Niger	2500	4.5	8.8	+ 95
Gorouol	Dolbel	Niger	7500	6.6	8.6	+ 32
Dargol	Tera	Niger	2750	6.2	8.4	+ 37
Dargol	Kakassi	Niger	6940	3.9	6.2	+ 57
Sirba	Garbe Kourou	Niger	38750	2.0	3.2	+ 61
Goroubi	Diongore	Niger	15350	2.3	2.3	0
Diamangou	Tamou	Niger	4030	3.5	2.3	- 35
Tapoa	Campement W	Niger	5330	0.9	1.0	+ 10
Mékrou	Barou	Niger	10500	(11)	(7)	- 33
Bani	Douna	Niger	101600	15.8	6.0	- 62

Pluie-Débit a donc été modifiée de part et d'autre de 1970. Pour compléter ce constat, le tableau 1 révèle que les coefficients d'écoulement peuvent augmenter sur certains bassins sahéliens du Burkina Faso et du Niger, entraînant même des écoulements plus importants alors que le contexte pluviométrique est déficitaire (Mahé *et al.*, 2005). Les raisons évoquées sont liées aux activités humaines et à l'impact de la variabilité climatique.

En termes de données d'observation, la conséquence est qu'un bassin pour lequel on ne dispose de données qu'avant 1970 peut être considéré comme non jaugé après 1970. A cela s'ajoutent le manque de soutien financier des états africains pour leurs services nationaux gestionnaire des réseaux de mesure de données hydroclimatiques et le désengagement de l'ORSTOM (ex IRD) de ces services à partir des années 1970.

Le constat est donc simple: les données se font de plus en plus rares et sont de bien moindre qualité; la région Afrique de l'Ouest et Centrale tend à devenir un vaste espace non jaugé (!); la nécessité d'avoir à sa disposition des données en quantité suffisante limite l'estimation des ressources en eau sur des bassins versants non jaugés.

Aussi, la transposition des observations a déjà été le souci de nombreux hydrologues à l'ORSTOM, aujourd'hui IRD. Certains, tel Rodier (1964), y ont répondu en proposant des relations empiriques. D'autres ont développé des méthodes originales (Le Barbé *et al.*, 1993). Pour sa part, l'équipe HydroSciences a proposé l'utilisation de modèles globaux conceptuels Pluie Débit.

## **ESTIMATION DE RESSOURCES EN EAU ET TENTATIVE D'EXTENSION AUX BASSINS NON JAUGES**

A partir de données journalières, des travaux de modélisation ont été menés pour permettre une estimation des écoulements à l'exutoire d'un bassin versant en milieu de savane dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire (Servat, 1993; Servat & Dezetter, 1993). Afin de pouvoir appliquer les résultats obtenus à des bassins non jaugés, il a été envisagé des prédéterminations des paramètres du modèle journalier (GR3J) à l'aide d'équations mettant en jeu différents types de variables:

- variables propres au bassin versant (surface et coefficient de Gravelius);
- variables pluviométriques (cumuls sur certaines périodes et ratios pluviométriques);
- variables liées à l'occupation du sol du bassin versant (proportions de savane, de forêt arbustive, de zones cultivées, et de zones d'habitat).

La qualité des ajustements obtenus, mesurée par le coefficient de détermination, ne varie qu'entre 0.323 et 0.870. Pour toute poursuite de ces travaux, plus que le résultat en tant que tel (assez décevant), ce qu'il faut retenir est:

- l'importance des totaux pluviométriques de début de la saison des pluies,
- l'importance de la couverture végétale (portion de forêt arbustive et d'espaces cultivés),

pour prédéterminer les paramètres du modèle GR3J.

Des essais ont été menés sur d'autres zones géographiques de Côte d'Ivoire: zone de forêt et zone de "transition" (entre forêt et savane). Ils se sont révélés négatifs.

## MISE AU POINT D'UNE MÉTHODOLOGIE D'EXPLOITATION DE DONNÉES PONCTUELLES DE DÉBITS ET DE DONNÉES RÉGIONALES POUR L'ESTIMATION DES PARAMÈTRES D'UN MODÈLE PLUIE-DÉBIT

Devant les échecs rencontrés depuis plus de trente ans par les méthodes classiques qui n'utilisent aucune information débitométrique sur les bassins, on se propose d'abandonner ici l'idée de trouver une estimation satisfaisante des paramètres du modèle sans aucune estimation de débit et d'explorer une voie différente où l'on exploiterait à la fois une information régionale et une information plus ponctuelle sur les débits. L'objectif est de déterminer le niveau minimal d'information nécessaire pour obtenir une estimation fiable des paramètres des modèles pluie-débit. Nous avons défini une méthodologie d'approche qui puisse nous permettre de remplir cet objectif.

Remarque: avant de débiter ce travail, des essais à partir d'une version journalière de GR ont révélé que même en supprimant aléatoirement 70% des données disponibles d'une chronique de débit, on pouvait caler le modèle de la même façon que si l'on disposait de toutes les données disponibles, et ce pour un bassin en régime tropical pur. Ce résultat montre donc que si l'information est très rare, il peut être quand même être possible de caler correctement un modèle hydrologique; il suffit qu'il y ait l'information nécessaire et suffisante (Vernay, 2004).

Les résultats présentés se basent sur des données d'une soixantaine de bassins versants en Afrique de l'Ouest (Laroche *et al.*, 2005)

### Détermination d'une information issue d'une approche régionale

L'information régionale retenue est la nature du régime d'écoulement du bassin versant tel qu'il a été défini par Rodier (1964). Cette classification (Tableau 2) se base sur des observations, sur des études et sur une très bonne connaissance du milieu. Même si elle date d'avant les changements climatiques observés en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale, les résultats obtenus semblent confirmer l'option prise.

**Tableau 2** Quelques caractéristiques de régimes hydrologiques rencontrés en Afrique de l'Ouest.

Régime hydrologique	Limites des isohyètes (mm)	Principaux bassins hydrologiques	Principales caractéristiques
Sahélien	300 à 750	Sirba, Dargol, Gorouol, Nakambé, Tapoa et une partie du bassin du fleuve Niger	Longue saison sèche, crue sporadique, importantes pertes par évaporation
Tropical pur	750 à 1200	Mouhoun, Nakambé, Comoé supérieure, et une partie du bassin du fleuve Niger	Présente une saison de hautes eaux en juillet à début octobre et une saison de basses eaux de début décembre à début juin.
Tropical de transition	Pan > 1200	Bandama, Sassandra et Niger supérieur	Il se distingue du régime tropical pur par une saison de hautes eaux beaucoup plus longue et une saison de basses eaux bien moins sévères.
Tropical de transition variante dahoméenne	1200 à 1400	Bassin moyen de la Comoé, du Couffo, du Mono, de l'Ouémé, et de tous les petits cours d'eau du centre du Bénin et du Togo.	Les étiages sont beaucoup plus rigoureux que dans le régime tropical de transition. Les modules sont plus faibles. A cet égard, ce régime ressemble beaucoup au régime tropical pur. La différence essentielle est une période de hautes eaux plus longue, mais pas plus abondante au total.

### Utilisation d'une information locale

L'information locale n'est autre qu'une partie de la chronique elle-même. L'information nécessaire dépendra de l'architecture du modèle et des caractéristiques de ce dernier, GR2M dans ce cas.

Pour les hydrogrammes simples d'Afrique de l'Ouest et Centrale (hydrogramme unimodal avec une période plus ou moins longue où les écoulements sont très faibles, voire nuls), comme pour les bassins en régime hydrologique sahélien ou tropical pur, l'information à fournir est constituée:

- des écoulements de hautes-eaux qui constituent une bonne approximation des volumes annuels écoulés,
- et d'une partie des écoulements de basses-eaux qui avec les débits de pointe de l'hydrogramme peuvent permettre de caler la décrue.

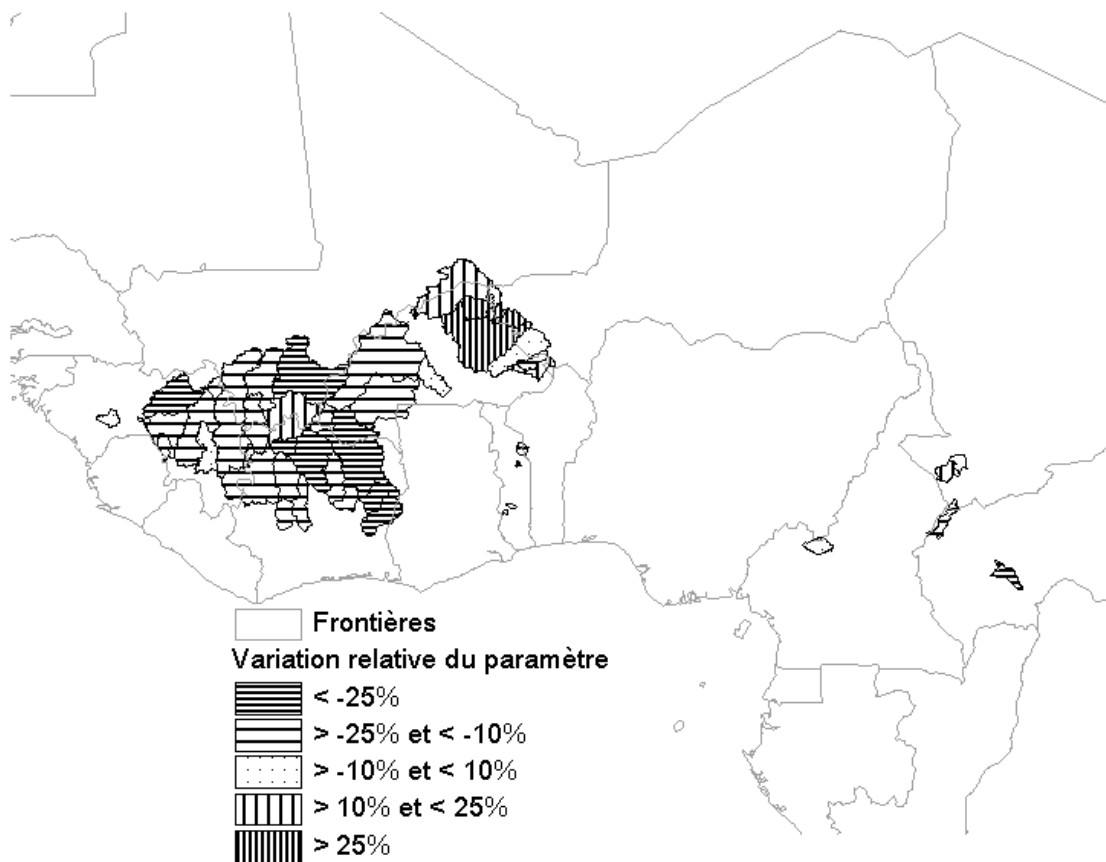
Les travaux se continuent pour les bassins en régime équatorial où les hydrogrammes sont généralement bimodaux et les écoulements de basses-eaux sont bien souvent loin d'être négligeables. Nous anticipons sur les résultats à venir mais il est probable que pour ces bassins, l'information nécessaire sera certainement plus importante pour caler correctement le modèle.

### PERSPECTIVES

Depuis quelques années, les travaux d'HydroSciences Montpellier se focalisent en particulier sur le pas de temps mensuel et sur de grands pas d'espace (# 2500 km<sup>2</sup>), échelles de temps et d'espace auxquelles il est raisonnable de planifier des actions en matière de ressources en eau à l'échelle d'un grand bassin versant ou d'une région.

Les résultats décevants que nous avons présentés sur un essai de prédétermination de paramètres d'un modèle ne prouvent cependant pas qu'il ne faille pas continuer dans cette voie: c'est sans doute que les données utilisées jusque là (se limitant bien souvent aux seules données climatiques) n'expliquent pas à elles seules les écoulements; c'est que d'autres caractéristiques inhérentes aux bassins de réception des précipitations expliquent bien plus fortement les écoulements (les résultats présentés le montrent). A l'heure des images satellites et des systèmes d'information géographique, une quantité d'information (liée à la physiographie des bassins, liée au paysage ...) est dorénavant disponible au sein de laquelle il faut chercher. Il ne semblerait pas inintéressant de refaire "tourner" des ACP ou tout autre outil d'analyses statistiques exploratoires en combinant toutes ces nouvelles données.

La Fig. 2 montre que géographiquement un certain nombre de bassins se comportent de la même façon en termes d'évolution d'un des paramètres du modèle GR2M de part et d'autre de 1970. Ce même comportement de certains bassins qui est propre au modèle (mais peut-être à d'autres modèles?) pourrait traduire un même comportement hydrologique de ceux-ci (sans pour autant affirmer que le modèle choisi reproduit exactement le comportement hydrologique du bassin versant considéré) et il pourrait être intéressant de composer ces techniques d'analyse avec ces comportements en modélisation.



**Fig. 2** Écarts relatifs entre les valeurs d'un paramètre de GR2M obtenues par calage avant et après 1970 (d'après Dufresne, 2004).

Hormis les modèles GR, l'équipe a utilisé d'autres modèles tels que le modèle VUB, le modèle WBM et le modèle de Yates. D'autres existent et mériteraient d'être appliqués à la zone d'étude sur laquelle nous travaillons. Ces modèles sont simples d'utilisation et les concepts sur lesquels ils s'appuient le sont aussi. Seuls changent la prise en compte des données d'entrée, l'agencement des réservoirs, les équations de vidange des réservoirs, la prise en compte ou non d'un éventuel apport souterrain, ...

Comme il n'existe pas de modèle conceptuel global unique, il apparaît comme vain de ne vouloir utiliser qu'un même modèle sur l'Afrique de l'Ouest. La Fig. 3 montre que le modèle GR2M donne de bons résultats (valeurs de Nash élevées) sur une partie de l'Afrique de l'Ouest mais que ses performances sont bien moindre ailleurs. L'idée serait de tester un ensemble de modèles sur les données existantes et d'analyser les différents résultats obtenus et, en particulier, quel est le modèle qui se cale le mieux et pourquoi? Cela est-il lié aux données disponibles ou à des facteurs explicatifs évidents? ... L'objectif serait de proposer ainsi une cartographie des "meilleurs" modèles en fonctions de critères qu'il faut définir.

Parmi les critères de choix, on peut citer ceux liés au calcul d'une fonction coût ou d'une fonction objectif. Mais ils ne me semblent pas suffisants. Le critère primordial pourrait être la quantification des incertitudes qui accompagnent les résultats de la modélisation.



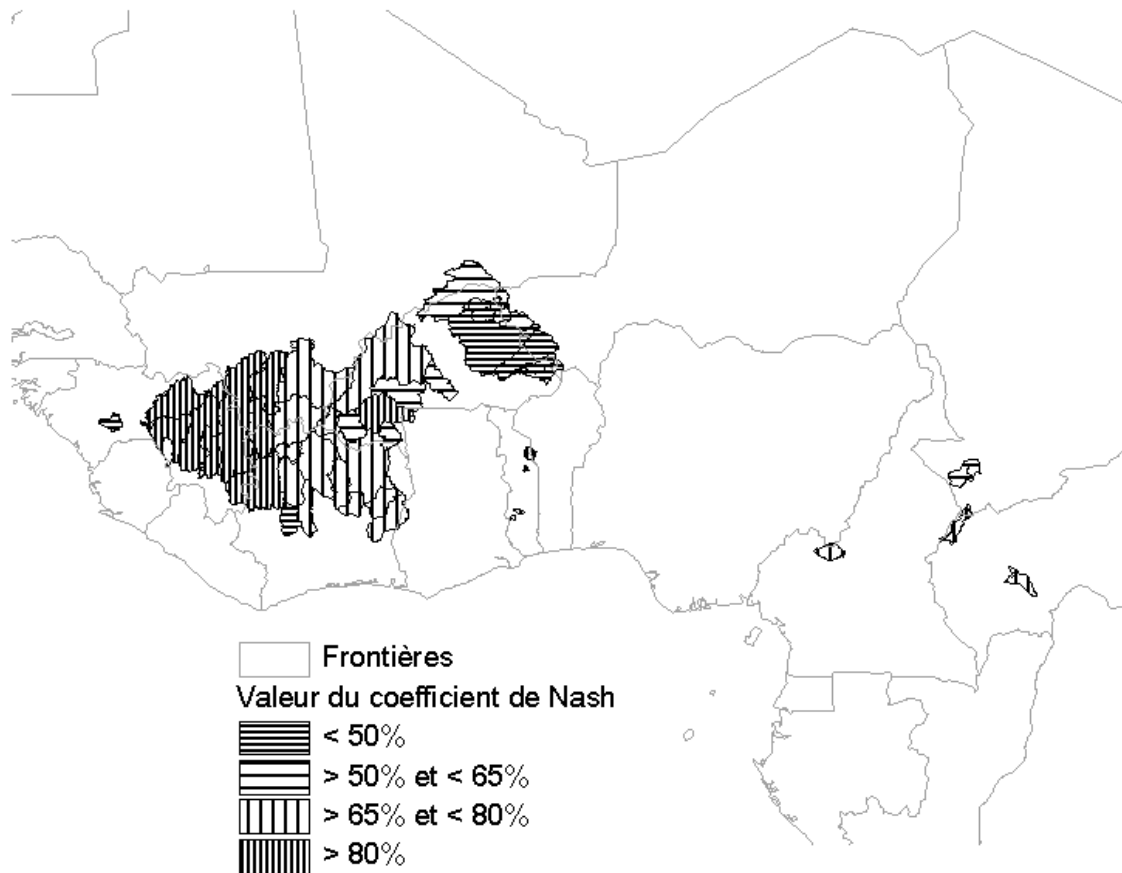


Fig. 3 valeur du coefficient de Nash pour quelques bassins ouest-africains (d'après Dufresne, 2004).

## CONCLUSIONS

Les différents contextes, scientifiques, hydroclimatiques et environnementaux, de l'Afrique de l'Ouest et Centrale ont conditionné la nature des travaux et les outils développés par HydroSciences Montpellier, depuis près de 20 ans:

- l'Afrique de l'Ouest et Centrale où les données hydrométriques se font de plus en plus rares et sont de qualité de plus en plus douteuses en dépit des efforts accomplis par les services nationaux gestionnaires des réseaux. Même sur des bassins jaugés, l'information est très parcellaire et on peut se considérer parfois dans une situation proche de celle des bassins non jaugés.
- Le contexte hydroclimatique qui a beaucoup changé depuis 35 ans. A la variabilité climatique, s'est superposé un développement effréné des activités humaines qui ont entraîné une modification profonde de la réponse des bassins versants aux événements pluvieux.
- Le modèle GR2M, modèle mensuel à 2 paramètres, se prête bien à ce milieu puisqu'il est peu "gourmand" en données et est robuste.

Parmi ces travaux, de nombreuses études ont été menées sur la thématique de la régionalisation. Différentes voies de recherche ont été entreprises qui nécessitent

d'autres développement, en particulier en raison des nouvelles données qui peuvent être acquises par les images satellitaires.

Pour plus de détail sur les méthodes ou les résultats exposés, le lecteur est invité à se référer aux références des auteurs de ce papier.

## RÉFÉRENCES

- Ardoin, S. (2004) Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Montpellier, France.
- Boyer, J. F. (2003) Développements et technologies mises en œuvre à l'IRD pour la construction du Système d'Information Environnemental sur les Ressources en Eau et leur Modélisation – SIEREM. Séminaire Gestion et mise à disposition des données environnementales, CEMAGREF, décembre 2003, Lyon, France.
- Boyer J. F., Servat E. & Dieulin C. (2004) A specific method of modeling and designing environmental information systems - the example of SIEREM, an environmental information system for water resources. BALWOIS, Mai 2004, Ohrid, Macédoine.
- Dufresne, M. (2004) Modélisation pluie-débit GR2M en Afrique de l'Ouest—Régions de confiance des paramètres du modèle. Stage de recherche, ENGEES.
- Edijatno & Michel C. (1989) Un modèle Pluie-Débit journalier à 3 paramètres. *La Houille Blanche* **2**, 113–121.
- Edijatno, Nascimento, N. O., Yang, X., Makhlof, Z. & Michel C. (1999) A daily watershed model with three free parameters. *Hydrol. Sci. J.* **44**(2), 263–277.
- FAO (1974–1981) *Digitized Soil Map of the World and Derived Soil Properties*. FAO, Rome, Italy.
- Laroche, C., Mounirou, L. A., Mar, A. L., Paturel, J. E. (2005). Necessary hydrometric information for a good estimation of hydrological functioning of watersheds in western Africa. Poster VIIème Assemblée Scientifique de l'AISH, 3–9 Avril 2005, Foz do Iguaçu, Brésil.
- Le Barbé, L., Ale, G., Millet, B., Texier, H., Borel, Y. & Gualde R. (1993) *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*. ORSTOM, Paris, France.
- Lubes-Niel, H., Paturel, J. E. & Servat, E. (2003) Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. *J. Hydrol.* **278**, 213–230.
- Mahé, G., Paturel, J. E., Servat, E., Conway, D. & Dezetter, A. (2005) The impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling in the Nakambe River, Burkina Faso. *J. Hydrol.* **300**(1–4), 33–43.
- Makhlof, Z. (1994) Compléments sur le modèle pluie - débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Cemagref Antony, Université Paris XI, Orsay, France.
- Ouedraogo, M. (2001) Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest—Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Montpellier, France.
- Rodier, J. (1964) *Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'ouest du Congo*. ORSTOM, Paris, France.
- Servat, E. (1993) Evaluation régionale des ressources en eau: application à la Côte d'Ivoire—Rapport de synthèse du programme ERREAU, ORSTOM, Abidjan.
- Servat, E. & Dezetter, A. (1993) Rainfall–runoff modelling and water resources assessment in northwestern Ivory Coast—tentative extension to ungauged basins. *J. Hydrol.* **148**, 231–248.
- Servat, E., Paturel, J. E., Kouamé, B., Travaglio, M., Ouedraogo, M., Boyer, J. F., Lubès-Niel, H., Fritsch, J. M., Masson, J. M. & Mariou B. (1998) Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In: *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century* (ed. by E. Servat, D. Hughes, J. M. Fritsch & M. Hulme) (Abidjan'98, Abidjan, Côte d'Ivoire, Novembre 1998), 323–338. IAHS Publ. 252, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Vernay, M. (2004). Changement climatique et impacts sur les normes hydrologiques: caractérisation et apport de la modélisation. DEA, ENPC.