

Analyse de la variabilité des ressources en eau en Afrique de l'ouest sahélienne par modélisation hydrologique à grands pas de temps et d'espace.

Ardoin S.¹, Dezetter A.¹, Servat E.¹, Mahé G.², Paturel J.E.², Dieulin C.¹, Boyer J.F.¹

¹ UMR Hydrosociences, IRD, BP 64501, 34394 Montpellier cedex 5, France

² IRD, 01 BP 182, Ouagadougou 01, Burkina Faso.

Résumé

En vue de simuler les écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale depuis 1950 et pour les décennies à venir, une modélisation pluie-débit a été développée au pas de temps mensuel et pour un maillage de 0,5°x 0,5°. Dans l'optique d'optimiser la procédure, nous comparons les performances de différentes options de modélisation. En ce qui concerne les grilles de données d'entrée, soit 32 combinaisons possibles, il ressort que l'ETP Penman, la capacité en eau maximale issue de la carte des sols de la FAO et la grille des pluies du Climate Research Unit conduisent aux meilleurs résultats. Compte tenu de la sécheresse qui sévit sur la région depuis 1970, il apparaît nécessaire de caler les modèles pour des conditions climatiques particulières.

INTRODUCTION

L'étude des impacts de la variabilité climatique sur les régimes hydrologiques est primordiale pour planifier la gestion des ressources en eau à grande échelle, particulièrement en Afrique de l'Ouest et Centrale. Dans cette optique, une modélisation spatialisée pluie-débit a été développée dans l'objectif de simuler les écoulements non seulement de nos jours mais également pour les décennies à venir. Pour cela, il est nécessaire de définir un protocole de modélisation simple afin de pouvoir l'appliquer sur le plus grand nombre de bassins versants de la sous-région. Nous présentons ici la méthode adoptée : détermination des grilles d'entrée les plus performantes et des périodes de calage et de validation à retenir.

DONNEES ET METHODES

Présentation de la modélisation

La modélisation spatialisée pluie-débit (Fig.1) permet de régionaliser les lames d'eau mensuelles écoulées à partir de données de pluie, d'ETP et de

capacité en eau, discrétisées sous forme de grille au maillage régulier de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$. La méthode proposée fait appel à deux modèles conceptuels de bilans hydrologiques : le Water Balance Model (Conway & Jones, 1999), noté WBM, et le modèle GR2M du Cemagref (Kabouya, 1990). Ces deux modèles présentent un fonctionnement comparable basé sur une procédure unique de production d'un écoulement direct, qui correspond à un fractionnement de la pluie mensuelle, et un écoulement lent provenant de la vidange d'un (WBM) ou de deux (GR2M) réservoirs dont le stock évolue en fonction de sa capacité en eau, de la pluie et de l'ETP.

Ces modèles comportent chacun deux paramètres dont les valeurs numériques sont obtenues après calage par optimisation d'une fonction critère, ici le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970). Pour l'optimisation des paramètres, le processus choisi est un enchaînement des méthodes de Rosenbrock et de Nelder & Mead (Dezetter, 1991).

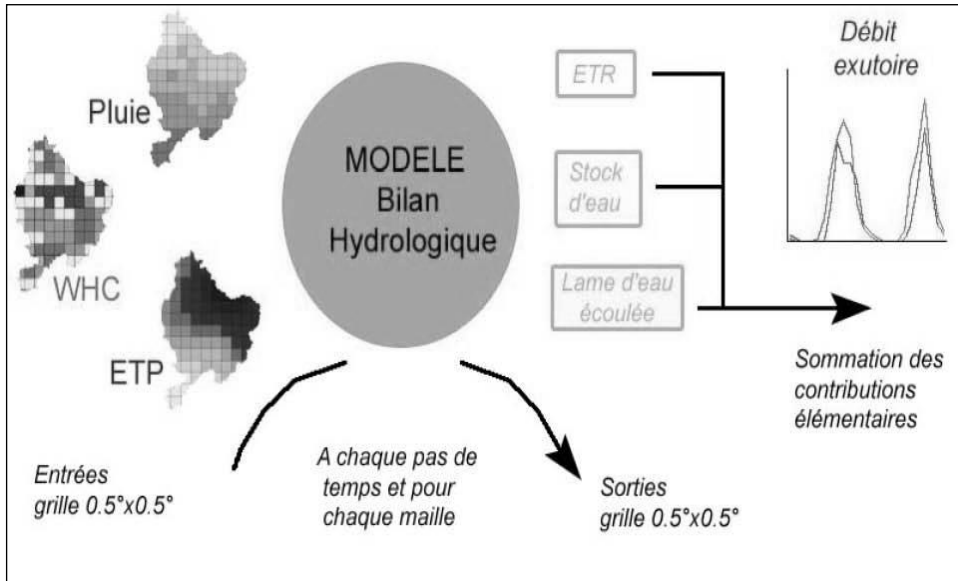


Fig.1 Schéma du fonctionnement de la modélisation pluie-débit employée

PRESENTATION DES DONNEES

Le Climatic Research Unit (CRU) de l'Université d'East Anglia (Norwich, U.K.) a fourni une grande partie des données : une grille de pluie mensuelle construite par interpolation (New *et al.*, 2000), une grille de capacité en eau du sol, notée WHC CRU, construite selon la méthode proposée par Dunne & Willmott (1996), 3 grilles d'évapotranspiration "ETP

PEN" (Penman,1956), "ETP FAO-Penman-Monteih" (Smith, 1992) et "ETP TO-Thom et Oliver" (1977). L'IRD a amené en complément des corrections et des mises à jour qui ont permis de générer une grille de pluie mensuelle à partir de la méthode des polygones de Thiessen et trois grilles de capacité en eau des sols générées à partir de la carte mondiale des sols de la FAO : capacité maximale (WHC FAOmax), capacité moyenne (WHC FAOmoy) et capacité maximale recalculée (WHC FAOsaxt) selon Reynolds (1999). La grille de pluie IRD reprend des stations longue durée utilisées par le CRU mais intègre en plus des postes de courte durée afin d'améliorer la densité du réseau. Seuls les postes présentant des lacunes pendant les mois de saison des pluies ont été éliminés. On travaille sur 42 bassins versants (Fig.2) situés en Afrique de l'Ouest et Centrale (fleuves Sénégal, Gambie, Sassandra et Logone-Chari) et couvrant des surfaces allant de 5 800 à 600 000 km².

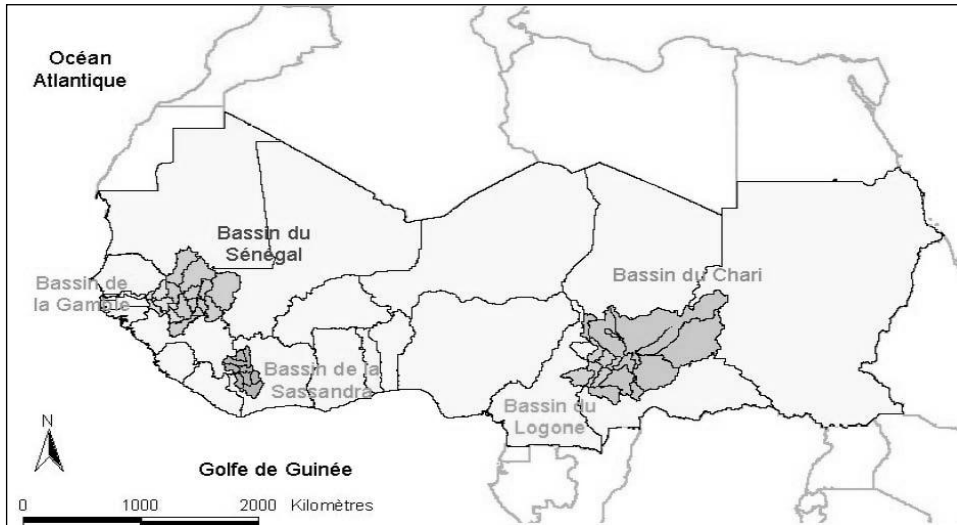


Fig. 2 Localisation des bassins versants étudiés.

OPTIONS DE MODELISATION

En vue de simuler les écoulements pour les décennies futures, nous avons cherché à déterminer pour chacun des bassins versants étudiés le ou les jeux de paramètres optimaux. Ceci passe par la détermination d'options de calage à savoir le choix des données d'entrées aboutissant au meilleur calage parmi toutes celles disponibles et à la sélection des périodes de calage et de validation à retenir.

Détermination de la combinaison des données d'entrée à retenir

1968 calages correspondant aux combinaisons « 2 modèles x 2 grilles de pluie x 3 grilles d'ETP x 4 grilles de WHC » pour les 41 bassins versants ont été effectués sur toute la période disponible. La figure 3 montre le pourcentage de cas où chaque type de données (ETP, WHC, pluie) est associée au meilleur calage, c'est-à-dire celui obtenant la valeur de Nash la plus élevée. La grille d'ETP PEN conduit à de valeurs de critères plus élevées que les deux autres formulations et représente 61 % des cas en meilleur calage. Concernant la grille de capacité en eau des sols, les WHC issues des données FAO fournissent les meilleurs résultats. 86,6% des meilleurs calages utilisent la grille FAOmax comme entrée. La grille de pluie CRU conduit à de meilleurs résultats dans 53,7 % des cas. Ceci peut paraître surprenant puisque l'amélioration de la spatialisation des pluies en intégrant des postes supplémentaires (grille IRD) devait aboutir à une meilleure reconstitution des écoulements générés. Cette différence est probablement liée au choix de la méthode de construction des grilles (interpolation par fonction Spline pour le CRU et méthode des polygones de Thiessen pour l'IRD) et à la densité du réseau de stations utilisées (276 postes pour le CRU contre 304 pour l'IRD). On observe des différences de valeur de pluie entre les deux grilles pouvant atteindre jusqu'à 8 %. L'impact en modélisation de ces deux composantes (méthode d'interpolation et densité du réseau) a été étudié et quantifié sur le Burkina Faso (Girard *et al.*, 2002) : une différence de valeur de pluie de 4 à 6 % implique un écart de 6 à 8 % sur la valeur du critère de Nash.

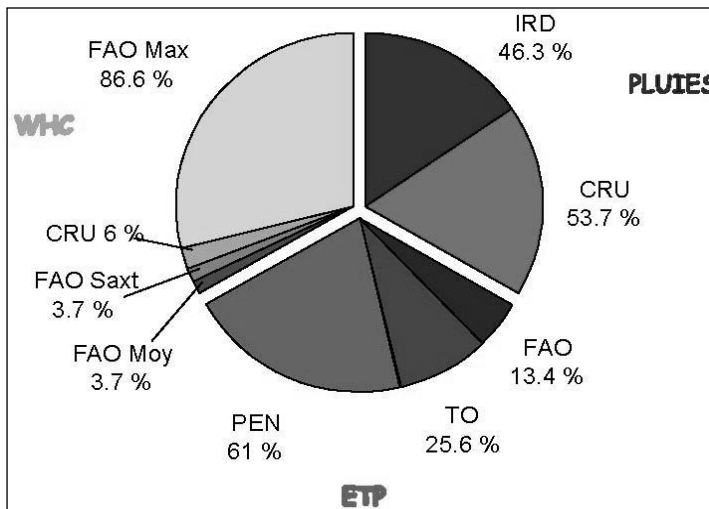


Fig.3 Résultats en termes de meilleurs calages pour l'ensemble des données sur les 41 bassins pour les sous populations de pluie, d'ETP et de WHC.

Détermination de la période de calage/validation

Sur notre échantillon de 41 bassins versants, les longueurs des séries de débits sont très variables avec des mesures s'étalant entre 1907 et 2000, mais dont la grande majorité commence dans les années 50. Comme les données de pluies et d'ETP à notre disposition s'étalent de 1950 à 1995, les séries hydrologiques finalement retenues varient entre 23 et 44 ans. Le changement des régimes pluviométriques et hydrologiques survenu entre 1969 et 1971 se traduit par un déficit pluviométrique de l'ordre de 20 % et s'accompagne d'une diminution des débits moyens annuels de 30 à 40 % (Paturel *et al.*, 1997). Ces conditions très particulières ont un impact non négligeable lors de la procédure de calage. S'appuyant sur cette modification des régimes, nous avons procédé au découpage des séries en deux sous-périodes dont le passage 1970-1971 marque la limite. Quatre possibilités ont été testées pour les 42 bassins versants avec la combinaison de données identifiée précédemment (Fig.4) :

- découpage 1 : calage sur la période humide et validation sur la période sèche,
- découpage 2 : calage sur la période sèche et validation sur la période humide,
- découpage 3 : calage et validation sur la période humide (dans les proportions 2/3 et 1/3),
- découpage 4 : calage et validation sur la période sèche (dans les proportions 2/3 et 1/3).

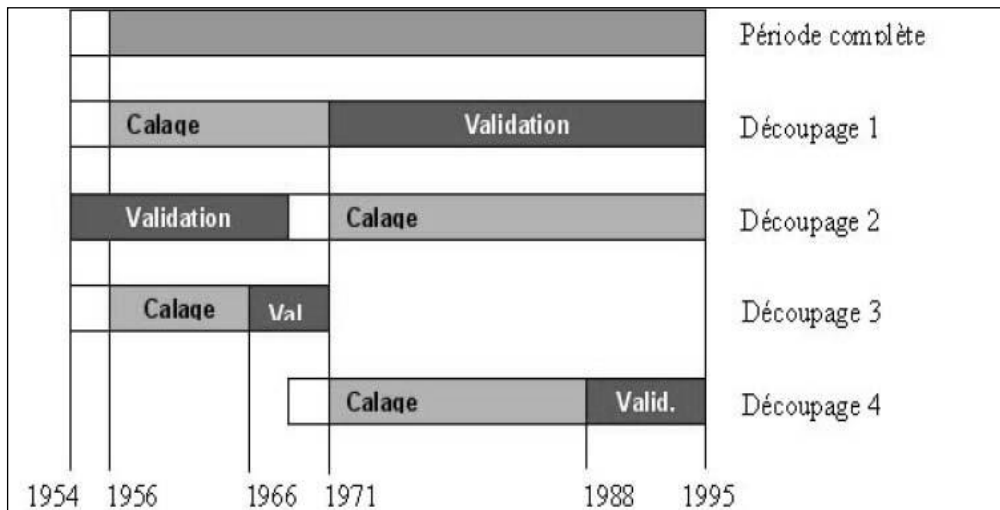


Fig.4 Exemple de découpages pour la Sassandra à Semien, 1954-1995.
(en blanc correspond les deux ans de mise en route des modèles).

La figure 5 présente les valeurs moyennes du critère de Nash obtenues pour les quatre séries de calage/validation. En calage, les performances moyennes du critère sont équivalentes quel que soit le découpage considéré : le Nash moyen varie de 77 % à 81 % pour le modèle GR2M et de 52-54 % pour le modèle WBM.

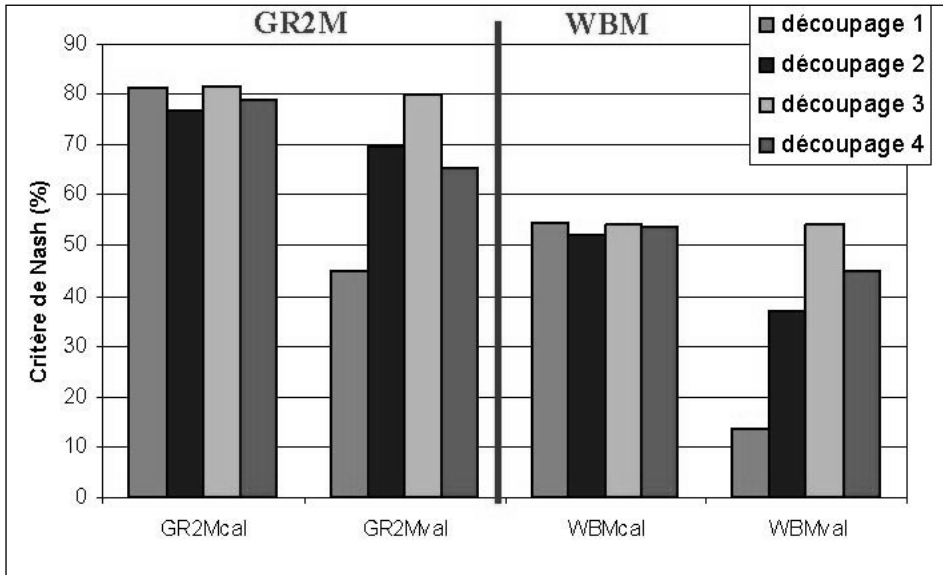


Fig.5 Performances moyennes de la fonction objectif en calage et en validation pour les quatre situations.

Cependant, une majorité des bassins versants présentent de meilleurs résultats en calage avec les découpages 3 et 4. Ainsi sur la période dite sèche (à partir de 1971) avec le modèle GR2M, 78,6 % des bassins calés sur 1971-1987 (découpage 4) obtiennent un critère de Nash supérieur à celui obtenu par calage sur 1971-1995 (découpage 2) (Fig.6). Les paramètres optimisés en calage en période humide sont moins bons pour une validation en période sèche (découpage 1), et vice-versa (découpage 2). De plus, les validations associées aux découpages 3 et 4 obtiennent de bien meilleurs résultats, et ce, aussi bien en terme de performance moyenne que pour plus de 76,5 % des bassins étudiés. Procéder au calage des séries sur des périodes réduites mais caractérisées par des conditions climatiques particulières semble augmenter les performances de la fonction critère pour la majorité des bassins étudiés.

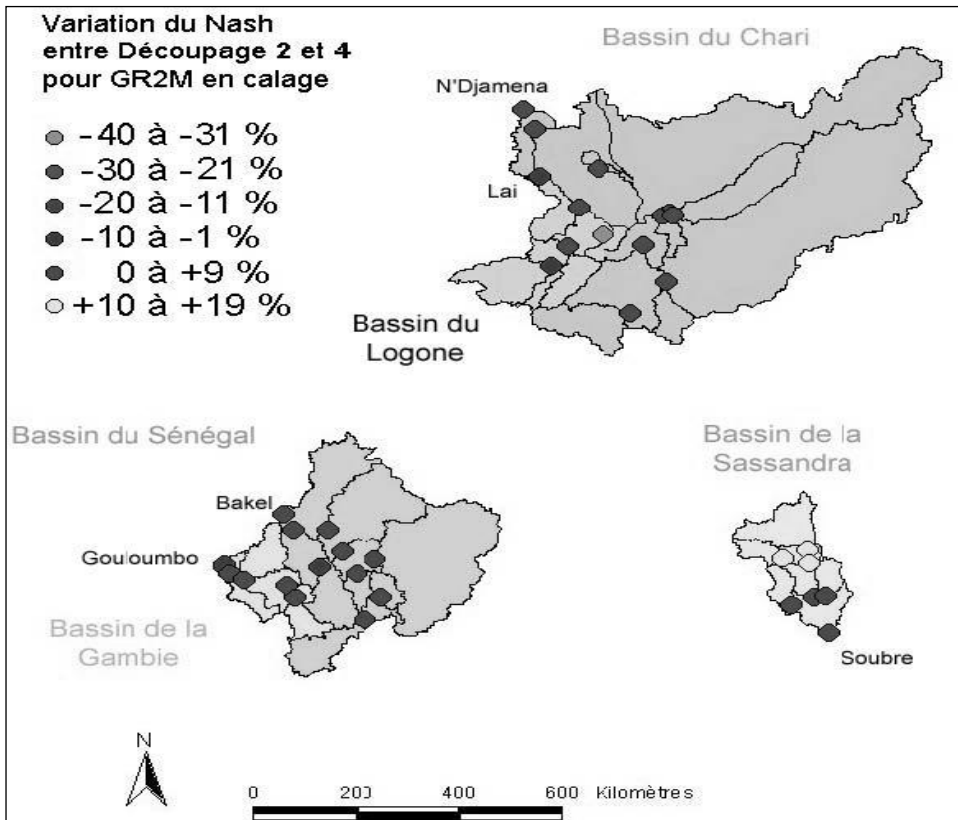


Fig.6 Variation de la fonction critère entre les découpages 2 et 4 : calage des bassins avec le modèle GR2M sur la période sèche (après 1971).

CONCLUSION

La combinaison « pluie CRU × ETP PEN × WHC FAOmax » semble donc la plus performante puisqu'elle conduit aux valeurs du critère les plus élevées pour la majorité des cas et ce quel que soit le modèle considéré. Cette combinaison est donc retenue pour tous les tests de modélisation. Si l'on se réfère au 3^{ème} rapport d'évaluation du changement climatique (IPCC, 2001), les experts s'accordent à dire que, malgré la multitude de scénarios envisagés et le nombre de modèles utilisés, les précipitations annuelles vont augmenter sur les régions de moyennes et hautes latitudes, ainsi que sur la plupart des régions équatoriales, mais vont diminuer sur les régions subtropicales. Dans le contexte actuel, la procédure de calage/validation dans les proportions 2/3-1/3 sur la période 1971-1995 semble donc la mieux adaptée pour envisager la simulation des écoulements pour les décennies futures.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Conway D., Jones P.D., 1999. Assessing the impact of future climatic change on water resources and the hydrology of the Rio de la Plata basin, Argentina. Final Report. Climatic Research Unit. University of East Anglia.
- Dezetter A., 1991. Modélisation globale de la relation pluie-débit. Application en zone de savanes soudanaises (nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat. Université Montpellier II. 422 p.
- Dunne K.A., Willmott C.J., 1996. Global distribution of plant-extractable water capacity of soil. *Int. J. Climatology* (16) pp.841-859.
- FAO/UNESCO, 1974-1981. Soil Map of the World, Ten volumes, UN Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- Girard S., Mahé G., Paturel J.E., 2002. Comparaison de plusieurs sources de données pluviométriques sur le Burkina Faso; Impact sur l'estimation des pluies et des débits modélisés. Rapport interne, IRD Ouagadougou, Burkina Faso.
- IPCC, 2001. Climate Change 2001 : Impacts, adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC. (Ed. by McCarthy J.J, Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J., White K.S.) Cambridge University Press, UK.
- Kabouya M., 1990. Modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de doctorat. Université Paris XI.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I- A discussion of principe. *J. Hydrol.* (10) pp. 282-290.
- New M., Hulme M., Jones P., 2000. Representing twentieth century space-time climate variability. Part II : development of a 1901-1996 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Climate*, vol 13 (13) pp.2217-2238.
- Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Lubes H., Fritsh J.M., Masson J.M., 1997. Manifestations d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In : Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty. Proceedings of Rabat Symposium (ed. by Rosbjerg D., Boutayeb N., Gustard A., Kundzerwicz Z.W., Rasmussen P.F.) IAHS Publ. (240) pp 21-30.

- Penman H. L., 1956. Evaporation : an introduction survey. Netherlands J. Agric. Sci., vol.1, pp. 9-29.
- Reynolds C.A., Jackson T.J., Rawls W.J., 1999. Estimating available water content by linking the FAO Soil Map of the World with Global Soil Profile Databases and Pedo-transfer Functions. Proceedings of the AGU 1999 Spring Conference, Boston, MA. May31-June4, 1999.
- Smith M., 1992. Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Report, Land and Water Development Division, UN Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- Thom A.S., Oliver H.R., 1977. On Penman's equation for estimating regional evapotranspiration. Q.J.R. Meterol. Soc. (193) pp.345-357.