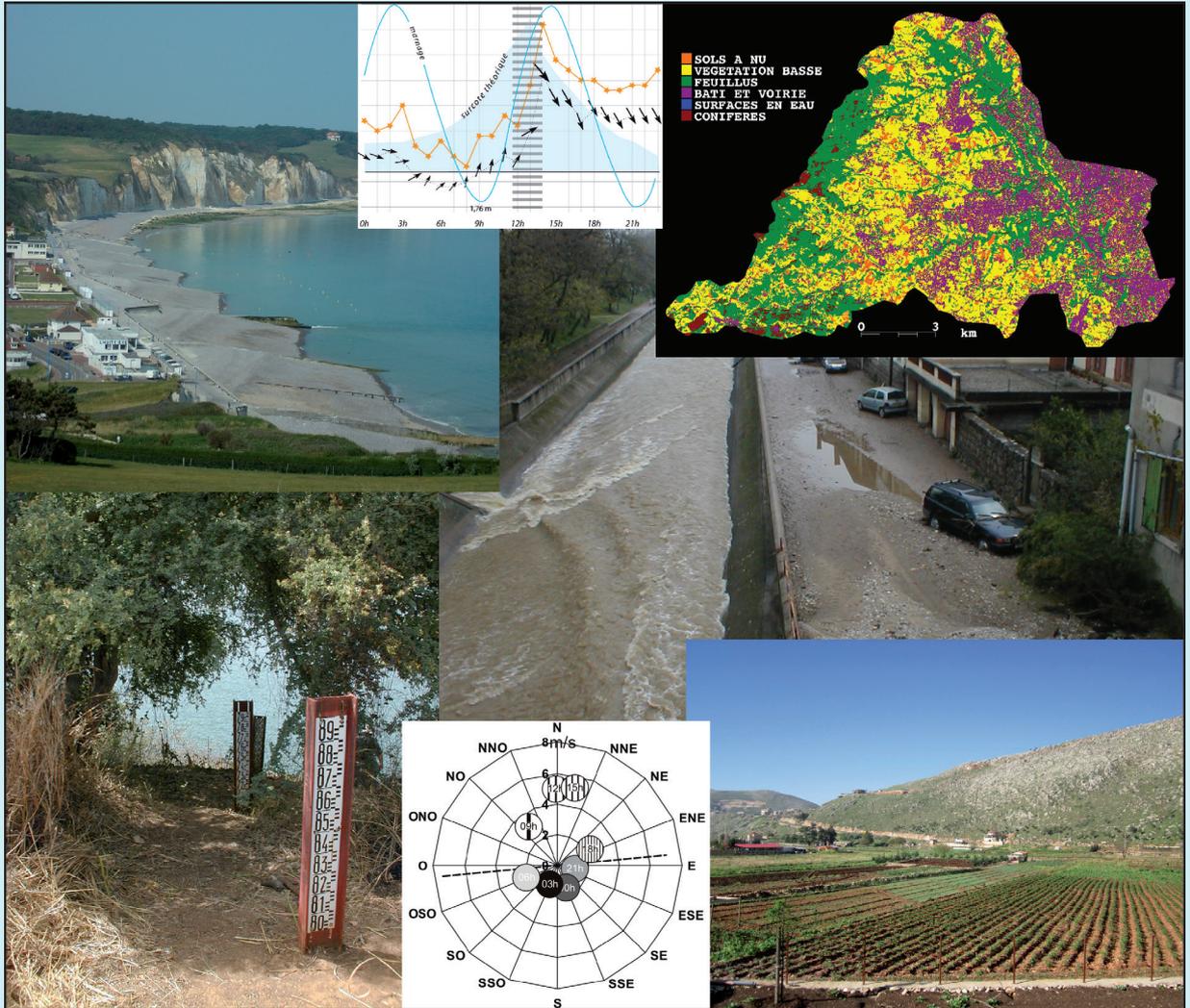


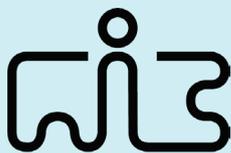
# CLIMATOLOGIE

2012 - Volume 9

CLIMATOLOGIE



vol. 9 (2012)



ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE  
Institut de Géographie 29, avenue Robert Schuman  
13261 AIX-en-PROVENCE Cedex - France

# APPORT DE LA MODÉLISATION PLUIE-DÉBIT POUR LA CONNAISSANCE DE LA RESSOURCE EN EAU : APPLICATION AU HAUT BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL

**Ansoumana BODIAN<sup>1</sup>, Alain DEZETTER<sup>2</sup> et Honoré DACOSTA<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> **Laboratoire Leïdi « Dynamique des milieux et développement », Université Gaston Berger (UGB)**  
BP 234 – Saint-Louis, Sénégal  
*dioung2001@yahoo.fr*

<sup>2</sup> **IRD, UMR HydroSciences, Université Montpellier 2**  
case MSE, place Eugène Bataillon - 34095 Montpellier cedex 5, France  
*alain.dezetter@ird.fr*

<sup>3</sup> **Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Département de Géographie (UCAD)**  
BP 5005 - Dakar-Fann, Sénégal  
*honore.dacosta@ucad.edu.sn*

## Résumé

Les chroniques de débit du haut bassin du fleuve Sénégal et de sa partie guinéenne sont souvent lacunaires, discontinues, de courte durée, et donc difficilement exploitables pour une analyse hydrologique fiable. L'objectif de ce travail est de simuler puis d'étendre, dans la mesure du possible, les séries hydrologiques en utilisant le modèle pluie-débit, au pas de temps mensuel, GR2M. Dans un premier temps, après avoir calculé les pluies de bassin selon trois méthodes d'interpolation (krigeage, fonction spline et distance inverse pondérée au carré), l'ETP moyenne et la capacité en eau maximale, minimale et moyenne du sol des bassins (ou *Water Holding Capacity* - WHC), nous avons effectué une analyse de sensibilité du modèle aux données d'entrée pluie et WHC. Ceci a permis de choisir les meilleures combinaisons de données d'entrée par bassin en fonction du critère de Nash-Sutcliffe. Nous avons ensuite procédé au calage et à la validation croisée du modèle avec les données d'entrée choisies afin de déterminer les jeux de paramètres du modèle qui traduisent le mieux la transformation de la pluie en débit. Une fois le jeu de paramètres choisi pour chaque bassin, nous avons appliqué cette version du modèle sur l'ensemble de la série pluviométrique disponible pour simuler les débits. Cette méthodologie a permis de compléter et d'étendre les séries de débits mensuels des bassins versants de Bafing Makana, Dakka Saidou et Sokotoro de 1960 à 2000.

**Mots-clés :** Haut bassin du fleuve Sénégal, modélisation pluie-débit, ressource en eau, GR2M.

## Abstract

### **Contribution of rainfall-runoff modeling to the knowledge of water resources: application to Upper Senegal River basin**

The knowledge of water resources and their seasonal variations in the upstream basin of the Senegal River in general and its Guinean part in particular is weak because of missing or too short hydrological time series. Streamflow series often show gaps, are non continuous or too short and consequently are difficult to use for reliable hydrological analysis. Thus the objective of this work was to simulate and extend hydrological data as much as possible, using the GR2M rainfall-runoff model. In a first step, after calculating catchment rainfall using three interpolation methods (kriging, spline function and inverse distance), mean potential evapotranspiration and the maximum, minimum and mean water holding capacity (WHC), a sensitivity analysis of the model to rainfall and WHC input data was performed. Hence we could choose the best combination of input data by catchment based on the Nash-Sutcliffe criterion. Then cross calibration-validation tests were performed using the selected input data to choose model parameter sets. Once the parameter set was chosen for each catchment, this model version was applied on the whole series to simulate streamflow. Thus the monthly flow series of the Bafing Makana, Dakka Saidou and Sokotoro catchments could be extended from 1960 to 2000.

**Keywords:** Upper Senegal River basin, rainfall-runoff modeling, water resources, GR2M.

## Introduction

A toutes les échelles territoriales, une bonne gestion des ressources en eau est une nécessité. Ce constat général prend encore plus de sens dans les régions subsahariennes, où le risque d'une pénurie d'eau lié à une mauvaise gestion des eaux aura des conséquences dramatiques pour les populations et l'activité socio-économique. Cependant, on ne peut bien gérer une ressource que quand elle est connue. Malheureusement, ces dernières décennies, les pays qui se partagent le bassin du fleuve Sénégal (Guinée-Conakry, Mali, Sénégal, Mauritanie) ont des difficultés à assurer correctement le suivi hydrologique du fleuve et de ses affluents. On assiste ainsi à une réduction du nombre de stations suivies, notamment à cause d'un manque de moyens humains et financiers. Dans la partie guinéenne tout particulièrement, la connaissance de la ressource en eau et de ses variations saisonnières présente des faiblesses avec des séries de données hydrologiques tronquées. Les chroniques de débit disponibles, par exemple à la Direction Nationale de l'Hydraulique (DNH) de Guinée, sont en effet souvent lacunaires, discontinues, de courte durée et, en conséquence, difficilement exploitables pour une analyse hydrologique fiable. Cette méconnaissance du haut bassin constitue un handicap majeur pour sa mise en valeur, le suivi du régime hydrologique du fleuve Sénégal dans la partie guinéenne n'étant pas assuré (Kane et Diallo, 2005). En outre, l'insuffisance de la connaissance quantitative des apports (affluents non contrôlés, suivi épisodique) présente une limite objective pour assurer une gestion optimale des ressources en eau du fleuve, mais aussi de la retenue de Manantali (OMVS, 2006), située sur le cours du Bafing en territoire malien.

Pour remplir sa mission, l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS) a besoin de données et d'informations lui permettant de suivre et de prévoir l'évolution de la ressource, compte tenu aussi de l'importance de la variabilité climatique de la région marquée par la récurrence de la sécheresse, des impacts potentiels du changement climatique et des impacts croissants de la pression démographique sur les ressources en eau. Ainsi, un effort de recherche important a été consenti pour améliorer la compréhension du fonctionnement hydrologique du haut bassin. Dans cet objectif, plusieurs travaux ont été réalisés : Bamba et Baldé (2005), Coly *et al.* (2005), Kane et Diallo (2005), CSE (2006), Nonguierma et Niang (2006). Cependant, il n'est pas toujours possible de disposer de séries chronologiques de débits continues et longues sur un même site dans la partie du haut bassin, permettant une détermination des ressources en eau ainsi qu'une connaissance et une prévision des situations extrêmes de crue ou d'étiage et de leurs risques d'occurrence.

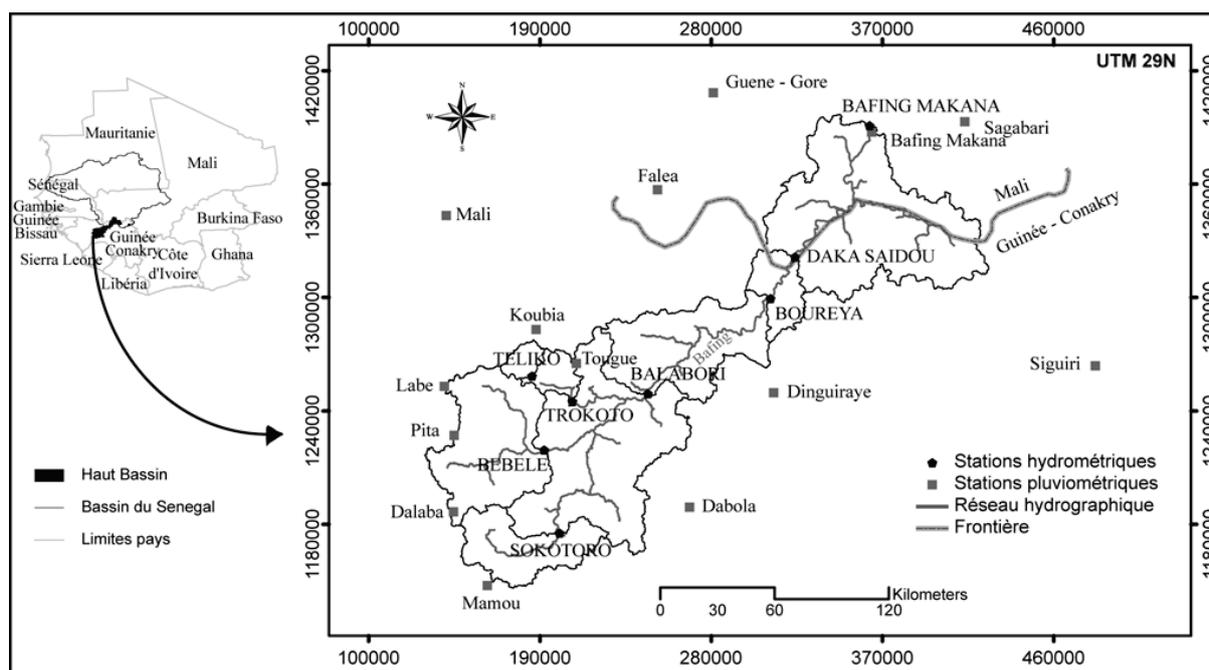
Les séries pluviométriques étant plus nombreuses et moins lacunaires, la modélisation de la relation pluie-débit est une des solutions pour pallier à ce manque de données. Parmi les nombreux modèles pluie-débit existants, la famille des modèles « GR » (Génie Rural) du Cemagref (GR1A, GR2M, GR4J) fait référence dans ce domaine en termes de simplicité de mise en œuvre, d'adaptabilité et de robustesse. Nous retenons ici le modèle conceptuel GR2M au pas de temps mensuel qui utilise deux paramètres, et dont la robustesse à simuler les écoulements en contexte africain a été montrée dans plusieurs études (Paturel *et al.*, 1995 ; Ouédraogo *et al.*, 1998 ; Mahé *et al.*, 2005 ; Ardoin-Bardin *et al.*, 2009). Dans le cadre de ce travail, nous cherchons à mettre en place une méthodologie permettant de simuler et d'étendre des données hydrométriques en utilisant les stations qui disposent d'un nombre minimum de données hydrométriques nécessaires au calage et à la validation du modèle. On pourra ainsi ultérieurement transposer cette méthodologie aux stations réhabilitées en 2007 dans le cadre du projet *Global Environmental Food* de l'OMVS. Sur le haut bassin, nous pourrions ainsi disposer de séries chronologiques de débits suffisamment longues pour une meilleure estimation des ressources en eau et de leurs fluctuations temporelles.

## 1. La zone d'étude

Le cadre d'étude est le haut bassin du fleuve Sénégal et concerne sept stations hydrométriques (tableau 1). Cet espace s'étend sur la Guinée Conakry et le Mali avec une superficie de 21 290 km<sup>2</sup> à la station hydrométrique de Bafing Makana (figure 1).

Stations	Cours d'eau	Superficie (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	Kc	L (km)	I (km)	Ip	IG (m/km)	Altitude max (m)	Altitude min (m)	Ds (m)
<b>Bafing Makana</b>	Bafing	21 290	1092	2,09	468,3	45,5	1,70	2,3	1389	215	336
<b>Daka Saidou</b>	Bafing	15 660	868	1,94	218,5	71,7	2,48	4,95	1389	306	619
<b>Balabori</b>	Bafing	10 910	478,9	1,28	157,5	69,2	2,66	5,68	1358	463	593
<b>Bébélé</b>	Téné	3509	267,6	1,26	86,6	40,5	3,23	8,33	1300	578	493
<b>Sokotoro</b>	Bafing	1639	194	1,34	66,8	24,5	3,74	11,22	1358	608	454
<b>Téliko</b>	Kioma	332,3	71,85	1,10	19,3	17,2	5,00	20,02	1030	643	365
<b>Trokoto</b>	Kioma	969,7	161,5	1,45	59,3	16,4	2,86	6,56	1030	641	204

**Tableau 1 :** Caractéristiques morphologiques des bassins versant : (Kc : indice de compacité de Gravelius ; L (km) : longueur du rectangle équivalent ; I (km) : largeur du rectangle équivalent ; Ip : indice de pente de Roche ; IG (m/km) : indice de pente globale ; Ds (m) : dénivellée spécifique). *Physiographic parameters of basins (Kc: Gravelius compacity index; L (Km): length of equivalent rectangle; I (km): width of equivalent rectangle; Ip: Roche slope index; IG (m/Km): global slope index; Ds (m): specific vertical drop).*



**Figure 1 :** Localisation du haut bassin du Sénégal, ainsi que des stations pluviométriques et hydrométriques. *Location of rainfall and discharge stations in the Upper basin of the Senegal River.*

Le haut bassin se caractérise par une végétation dense mais qui présente des signes de dégradation due aux effets conjugués des facteurs naturels (sécheresse et érosion) et anthropiques (défrichement, feux de brousse, surexploitation des ressources forestières, surpâturages) (CSE, 2006). Le réseau hydrographique du haut bassin est dense mais les sols et les formations géologiques ne permettent pas l'existence de nappes importantes (Rochette, 1974). En effet, les roches dures représentent près de 54 % des affleurements (Coly, 1996). Toutefois, D. Orange (1992) souligne que les progrès accomplis tant dans le domaine de l'hydrogéologie que dans celui des disciplines connexes (hydrologie de surface,

géomorphologie, pédologie et géochimie) autorisent à nuancer les propos de Rochette (1974). Dans certaines conditions, ces formations composées de roches éruptives et métamorphiques peuvent contenir des ressources exploitables. Coly (1996) abonde dans le même sens en affirmant que 47 % des terrains sont susceptibles de renfermer des nappes ; ainsi, la présence d'aquifères est en rapport avec les linéaments (fissures, diaclases...) et le niveau d'altération liés aux processus physico-chimiques. A ce titre, Dione (1996) signale que dans le Fouta Djallon, la tectonique et l'altération, assez fréquentes, se traduisent par des réseaux de fractures, de diaclases et de fissures susceptibles d'abriter des aquifères. D'une manière générale, la valeur des indices de pente (indice de compacité de Gravélius ; longueur du rectangle équivalent ; largeur du rectangle équivalent ; indice de pente de Roche ; indice de pente globale ; dénivelée spécifique), calculés à partir des données SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de 90 m de résolution, issues de la NASA (Farr et Kobrick, 2000 ; Werner, 2001), décroît de l'amont vers l'aval, traduisant l'importance du volume montagneux du Fouta Djallon et la forte incision du relief. On constate par ailleurs que l'ensemble des sous-bassins ont des altitudes moyennes assez élevées pour la région (tableau 1). Du point de vue climatique, le haut bassin du fleuve Sénégal appartient à la zone guinéo-soudanienne caractérisée par une seule saison des pluies dans l'année qui va d'avril à octobre (Dione, 1996 ; Bodian, 2011). La pluviométrie moyenne annuelle est de 1490 mm. Elle est due au déplacement de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) du sud vers le nord induisant la pénétration de la mousson ouest-africaine régie par le contraste thermique entre la mer et le continent. Sur le plan aérologique, il y a la confrontation de deux masses d'air : l'un chaud et sec, l'harmattan, provenant du Sahara qui dirige un flux de Nord-Est en saison sèche et l'autre, chaud et humide, venant du golfe de Guinée au Sud-Ouest.

## 2. Données et modèle hydrologique

Quatre types de données sont nécessaires pour l'utilisation du modèle GR2M : la précipitation mensuelle, l'évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle, la capacité de rétention en eau du sol (ou *Water Holding Capacity* - WHC) et les débits moyens mensuels.

### 2.1. Les précipitations

Les données de précipitation, de l'origine des stations à 2005, proviennent des Directions de la Météorologie Nationale (DMN) de la Guinée et du Mali. Elles sont de qualité et de durée variables selon le pays et la plus courte chronique est de 30 ans. L'inventaire des données pluviométriques est présenté dans le tableau 2 et leur répartition spatiale en figure 1. Une période de référence 1960-2000 a été définie à partir des données du tableau 2, cette période ayant la particularité de présenter des données communes pour pratiquement l'ensemble des stations retenues pour l'étude.

L'analyse des données pluviométriques annuelles homogénéisées sur la période 1923-2005 (Bodian *et al.*, 2011) par la méthode du vecteur des indices de précipitation (Brunet-Moret, 1971, 1977) a montré que les chroniques ne sont pas stationnaires et qu'elles ont subi une rupture sérielle comprise entre 1957 (Mali) et 1976 (Bafing Makana). Quatre-vingt pourcents des stations présentent une rupture comprise entre 1960 et 1970 et les déficits ultérieurs varient entre 12 % (Dinguiraye et Siguiiri) et 24 % (Labé). À l'échelle mensuelle, en travaillant sur les stations dont les chroniques sont les plus complètes (Mamou, Labé et Siguiiri), Bodian *et al.* (2011) constatent que les précipitations moyennes des mois les plus pluvieux sont presque systématiquement inférieures aux valeurs avant rupture, seul le mois de mai à la station de Labé faisant modestement figure d'exception. L'influence de la sécheresse sur les pluies journalières a été mise en évidence par ces auteurs par l'étude des fractions pluviométriques des trois stations principales. Ainsi, une tendance à la diminution du cumul

de pluies supérieures à 40 mm (qui sont considérées comme les fortes pluies) se dessine à partir des années de rupture. Aux variations temporelles, s'ajoutent les variations spatiales des précipitations. Les fluctuations des isohyètes sur l'ensemble du bassin montrent globalement un glissement vers le sud (Bodian *et al.*, 2011).

Station	Altitude (m)	Date Début	Date Fin	% lacunes	P. an. moy. (mm)
<b>Bafing Makana</b>	239	01/01/1963	01/09/1997	37,5	1190
<b>Dabola</b>	438	01/01/1933	01/10/2001	14,6	1514
<b>Dalaba</b>	1202	02/01/1934	31/12/2003	7,0	1977
<b>Dinguiraye</b>	490	16/01/1922	16/12/2005	43,7	1375
<b>Faléa</b>	455	01/03/1956	31/12/2003	30,4	1433
<b>Labé</b>	1025	16/01/1923	16/12/2006	0,7	1626
<b>Mali</b>	1464	16/01/1931	16/12/2005	26,2	1625
<b>Mamou</b>	782	02/01/1921	31/12/2008	1,9	1881
<b>Siguiri</b>	362	02/01/1922	30/06/2007	1,7	1272
<b>Tougué</b>	86	16/01/1923	16/08/2004	22,3	1559
<b>Pita</b>	841	16/01/1925	16/12/2004	18,6	1609
<b>Koubia</b>	574	02/01/1969	01/11/1999	39,3	1397
<b>Guene - Gore</b>	240	01/05/1956	31/12/2002	26,7	1246
<b>Sagabari</b>	332	01/07/1959	01/09/1997	18,7	1151

**Tableau 2** : Liste des stations pluviométriques retenues (P. an. moy. = précipitations annuelles moyennes fournies par les valeurs mesurées ; Date Fin = date de fin de la chronique qui a été fournie ; % lacunes = pourcentage des jours sans mesure disponible). *List of selected rainfall stations (P. an. Moy. = mean yearly rainfall from observed values; Date Fin = end of the record; % lacunes = percentage of days without measurement).*

## 2.2. Les données d'évapotranspiration potentielle

Les données d'ETP, calculées selon la formule de Penman (1948), proviennent de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) de Guinée. Elles couvrent la période 1953-1995 pour Labé, au sud du bassin, et la période 1957-1996 pour Siguiri, située au nord-est du bassin. Le tableau 3 donne un inventaire des données disponibles. Pour avoir la même période couverte que les données pluviométriques (1960-2000), les valeurs manquantes ont été comblées par les moyennes mensuelles de la série à cause de la faible variation interannuelle de cette variable.

Nom	Longitude (° décimaux)	Latitude (° décimaux)	Altitude (m)	Date Début	Date Fin	% lacunes	ETP moy. annuelle (mm)
<b>Labé</b>	-12,30	11,32	1025	01/01/1953	31/12/1995	13	1487
<b>Siguiri</b>	-9,17	11,43	362	01/01/1957	01/10/1996	26	1533

**Tableau 3** : Inventaire des données d'ETP disponibles. *Inventory of available ETP data.*

## 2.3. Les données caractéristiques des sols

Les données de capacité de rétention en eau du sol ont été fournies par le laboratoire HydroSciences Montpellier sous forme de grilles à la résolution du demi-degré carré. Il s'agit de trois séries de grilles mensuelles de données sur la capacité de rétention en eau du sol construites à partir de la carte des sols diffusée par la FAO (Fao-Unesco, 1974-1981). En s'appuyant sur la granulométrie du sol, le couvert végétal, les valeurs de la profondeur racinaire et les valeurs limites de succion, la FAO a défini sept classes (A à F) de capacité en eau (tableau 4), auxquelles s'ajoute une dernière classe correspondant aux 'Zones Humides' (ou *Wetlands*). Chaque classe de sols comprend des valeurs minimales et maximales de

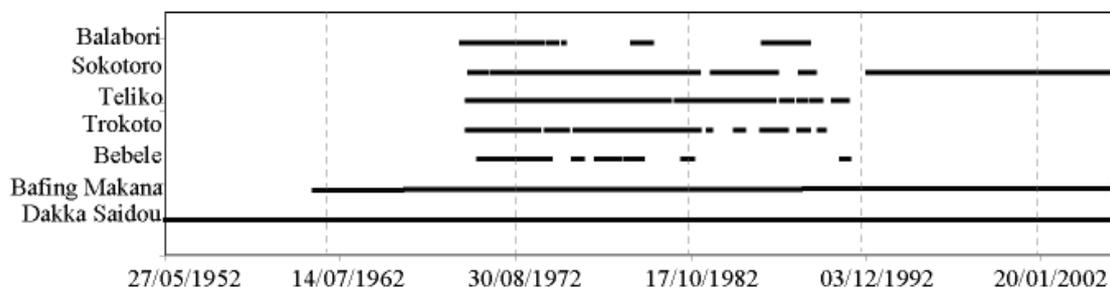
capacité en eau. Diello (2007) précise qu'aucune information n'est disponible pour la valeur à attribuer à la classe W (Wetlands) qui correspond à des types de sols marécageux. Cependant, lors d'études antérieures (Ouedraogo, 2001 ; Ardoin-Bardin, 2004 ; Diello, 2007), une valeur empirique et assez arbitraire de 1000 mm a été attribuée à cette classe. C'est cette même valeur que nous retiendrons aussi.

Classe	Capacité de rétention en eau <i>WHC</i> (mm)
A	> 200
B	150 – 200
C	100 – 150
D	60 – 100
E	20 – 60
F	0 – 20
W (Wetlands)	Non Communiqué

**Tableau 4** : Classification des sols selon la capacité de rétention en eau (d'après Fao-Unesco, 1974-1981). *Soil classification depending of the water holding capacity (source: Fao-Unesco, 1974-1981).*

## 2.4. Les données hydrologiques

Les données hydrologiques utilisées sont issues de la banque de données de l'OMVS. Les séries sont souvent incomplètes et présentent des lacunes. La figure 2 donne un chronogramme des données disponibles, illustrant le caractère très lacunaire des données de certaines stations hydrométriques (Balabori, Bébélé, Téliko et Trokoto). Celles-ci n'ont pas pu être retenues pour la suite de l'étude. En effet, le modèle GR2M a besoin d'un nombre minimum de données de débit pour son calage et sa validation.



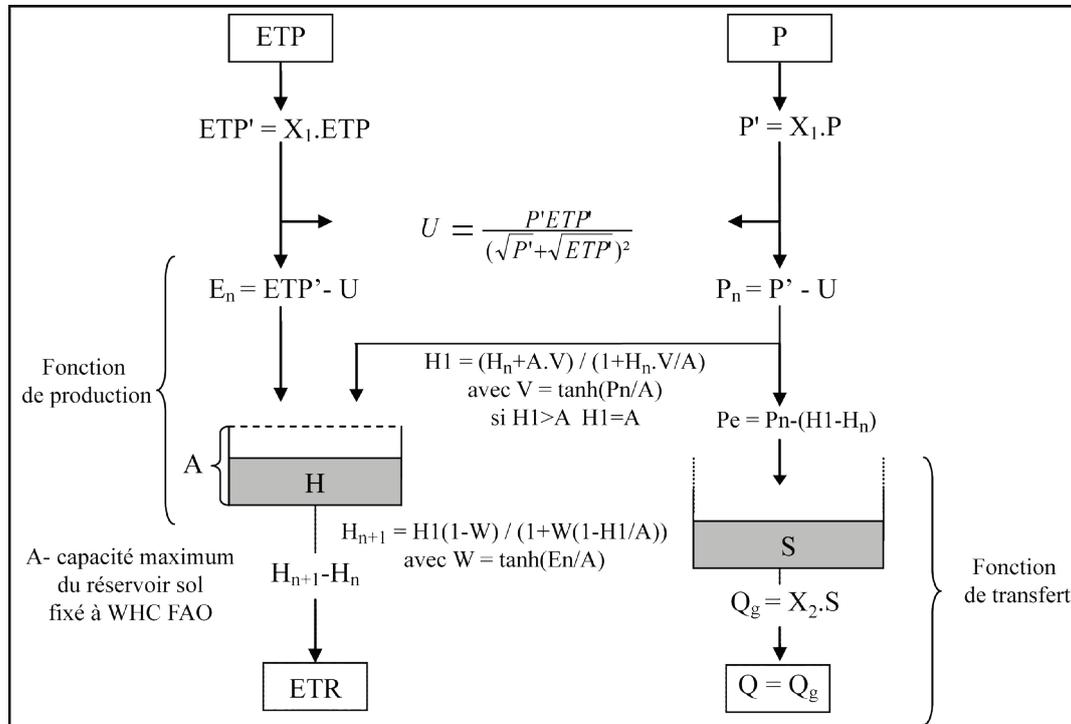
**Figure 2** : Chronogramme des débits mensuels disponibles par stations. *Chronogram of available monthly discharge time-series.*

Nous avons choisi de travailler avec les stations qui disposent d'au moins cinq années de données complètes. Néanmoins, ces stations lacunaires ont été réhabilitées, dans le cadre du projet GEF/BFS de l'OMVS en 2007, ce qui permettra au bout de cinq années de suivi hydrologique de pouvoir disposer de données supplémentaires pour l'utilisation du modèle afin de simuler et d'étendre les séries de débit sur la base de la méthodologie qui a été développée. Finalement, seules les stations de Bafing Makana, Dakka Saidou et Sokotoro seront utilisées ici pour la modélisation des écoulements.

## 2.5. Le modèle hydrologique GR2M

Nous utilisons une version semi-globale du modèle GR2M (Makhlouf et Michel, 1994). Il s'agit d'un modèle hydrologique conceptuel global qui fonctionne au pas de temps mensuel. Il contient deux paramètres libres à caler X1 et X2 : X1 intervient dans la partie « fonction de production » alors que X2 intervient dans la partie « fonction de transfert ». La fonction de

production traduit la transformation proprement dite de la pluie en lame d'eau disponible au ruissellement ; la fonction de transfert traduit le mouvement de cette lame d'eau, accumulée au sol lors de la précipitation, vers l'exutoire du bassin versant. Ces deux paramètres sont déterminés pour l'ensemble du bassin versant. La figure 3 présente le schéma conceptuel du modèle. On se référera à Makhlouf et Michel (1994) et à Paturel *et al.* (1995) pour la description détaillée du modèle.



**Figure 3** : Schéma conceptuel du modèle GR2M. *Conceptual scheme of the GR2M model.*

Les écoulements mensuels sont simulés en utilisant une distribution du bassin versant en un maillage régulier au demi-degré carré (soit environ 55 x 55 km). Sur chaque maille du bassin versant et à chaque pas de temps, le niveau du réservoir de production, dont la période d'initialisation est de deux ans, évolue en fonction de la pluie, de l'ETP et de sa taille maximale estimée à partir de la carte des sols de la FAO (Dieulin, 2005). La taille maximale du réservoir de production est donc fixée par demi-degré carré à la valeur fournie par la FAO (maximum, moyenne ou minimum selon la grille testée). Cette taille de réservoir de production avait été fixée par les auteurs à 200 mm pour une utilisation en France métropolitaine, mais des travaux antérieurs (Dezetter *et al.*, 2008) ont permis de montrer qu'en Afrique de l'Ouest, la carte FAO des sols permettait de fournir une valeur plausible utilisable. La valeur A du schéma conceptuel (figure 3) est donc assimilée à la valeur WHC. L'évolution du réservoir de production (noté A sur la figure 3) permet de déterminer l'eau disponible pour l'écoulement dont l'étalement est assuré par le réservoir de transfert (S) de taille infinie et de paramètre de vidange X2. L'écoulement à l'exutoire du bassin versant est obtenu par la sommation des contributions des différentes mailles du bassin versant.

### 3. Méthodologie

La méthode adoptée dans ce travail comporte les quatre étapes suivantes :

- 1) le calcul des pluies de bassin, de l'ETP moyenne et de la capacité de rétention en eau du sol des bassins ;

- 2) l'analyse de la sensibilité du modèle et des choix des jeux de données d'entrée du modèle ;
- 3) le calage et la validation croisés du modèle avec les données d'entrée choisies à l'étape précédente ;
- 4) la simulation des écoulements des bassins en utilisant les jeux de paramètres validés.

### 3.1. Calcul des pluies de bassin

Trois grilles de pluie moyenne mensuelle couvrant la période 1960-2000 ont été construites à partir des données ponctuelles de précipitation des 14 stations de références choisies en utilisant trois méthodes d'interpolation à l'aide du logiciel Surfer® : le krigeage, la fonction spline (de type cubique telle qu'implémentée dans Surfer® 7.0) et la distance inverse pondérée au carré.

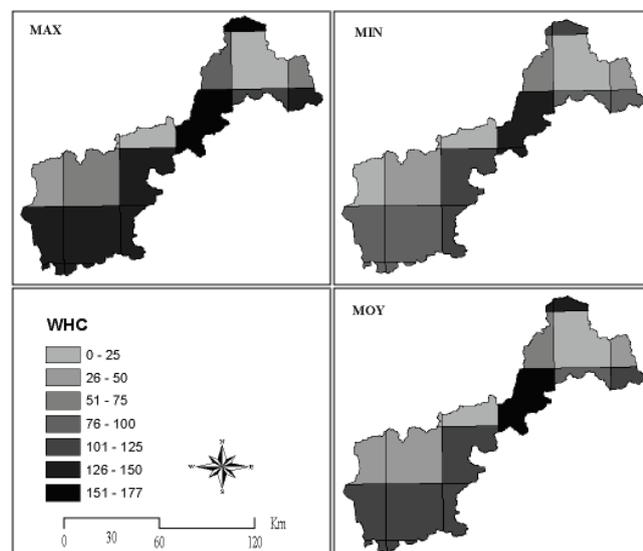
### 3.2. Calcul de l'ETP moyenne

L'ETP moyenne mensuelle est calculée à partir des données de la station de Labé et de Siguiri, sur la période 1960 -1996, par une simple moyenne arithmétique. En effet, la variabilité spatiale de l'ETP mensuelle est faible dans cette région et le modèle GR2M utilisé est peu sensible à cette variable (Paturel *et al.*, 1995 ; Ardoin-Bardin *et al.*, 2001). Ensuite, pour avoir la même période d'observation que les données pluviométriques, les valeurs manquantes d'ETP (1997-2000) ont été étendues par les moyennes mensuelles interannuelles de la série.

### 3.3. Estimation de la capacité de rétention en eau du sol (WHC)

Afin de déterminer le WHC des bassins, Dieulin (2005) a mis au point une méthode dont nous rappelons ici les principales étapes. La carte des sols de la FAO découpe la zone d'étude en polygones irréguliers auxquels sont associés des valeurs de WHC. Pour les besoins de la modélisation, nous avons croisé cette information avec le contour des bassins et avec une grille régulière dont la maille unité fait un demi-degré carré, puis extrait la valeur de WHC sur cette maille unité (Diello, 2007). Pour chaque type de sol et de WHC associés, on retient trois valeurs de capacité de rétention en eau (figure 4) : (i) une valeur minimale (notée WHC Min) correspondant à la limite inférieure de la classe considérée, (ii) une valeur maximale (notée WHC Max) égale à sa limite supérieure, (iii) une valeur moyenne (notée WHC Moy) égale à la moyenne arithmétique des limites inférieure et supérieure de la classe.

**Figure 4 :** Capacité en eau des sols (*Water Holding Capacity* – WHC) du bassin de Bafing Makana pour les valeurs maximales (MAX), minimales (MIN) et moyennes (MOY), suivant les données de la FAO. *Maximum (MAX), minimum (MIN) and mean (MOY) values of Soil Water Holding Capacity in the basin of Bafing Makana from FAO data.*



### 3.4. Optimisation du modèle

L'optimisation (ou calage) des paramètres du modèle nécessite la définition d'une fonction quantifiant l'erreur du modèle, c'est-à-dire la distance entre les débits observés et ceux simulés. Le critère quantitatif utilisé pour mesurer la qualité des ajustements réalisés par le modèle est celui proposé par Nash et Sutcliffe (1970), appelé Nash dans l'usage courant en hydrologie, et défini de la manière suivante :

$$Nash(Q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Où  $Q_{obs,i}$  est le débit observé au pas de temps  $i$ ,  $Q_{calc,i}$  est le débit simulé au pas de temps  $i$ ,  $\overline{Q_{obs}}$  est le débit moyen observé,  $N$  est le nombre total de pas de temps de la période de simulation.

Le critère de Nash permet d'évaluer la qualité des résultats des simulations en comparaison des observations, à la fois en terme de phase et d'intensité (Nash et Sutcliffe, 1970). Il varie de  $-\infty$  à 1. Le modèle ajusté est d'autant meilleur que cette fonction est proche de 1. Un critère de Nash inférieur à 0,6 est l'indication d'un modèle défailant sur le bassin versant étudié (Ardoin-Bardin, 2004).

### 3.5. Procédure de test en calage et en validation

Les modèles requièrent une phase de spécification des paramètres qui doit se faire sur des séries de données suffisamment longues pour lesquelles il faut supposer qu'il n'y a pas eu de changement dans les caractéristiques hydrologiques ou physiographiques du bassin versant (Diello, 2007). La rupture climatique constatée entre 1960 et 1970 pour 80 % des stations pluviométriques du haut bassin du Sénégal (Bodian *et al.*, 2011) a introduit une hétérogénéité dans les séries de données climatiques, et donc potentiellement une modification du fonctionnement hydrologique des bassins versants (Kouassi *et al.*, 2012 ; Ruelland *et al.*, 2012). Le choix des périodes de calage devient alors primordial pour la spécification des paramètres du modèle. Nous avons défini des périodes longues de 5 ans puis de 10 ans (Andréassian *et al.*, 2003 ; Diello, 2007 ; Dezetter *et al.*, 2010 ; Kouassi *et al.*, 2012) dans les séries de débits des bassins versants de Bafing Makana et de Dakka Saidou. Par contre, pour le bassin de Sokotoro, ce découpage n'a pu être appliqué à cause du manque de données, et il est donc effectué en fonction des périodes couvertes par les séries (figure 2). L'ajustement des deux paramètres ( $X_1$  et  $X_2$ ) du modèle est réalisé successivement pour chaque période par calage automatique (enchaînement des procédures d'optimisation de Rosenbrock et du Simplex ; Servat et Dezetter, 1988), puis le modèle est validé pour toutes les autres périodes. Cette validation croisée du modèle permet de voir quels sont les paramètres qui valident au mieux les autres périodes et qui traduisent le plus correctement la relation pluie-débit. Ensuite, ces paramètres seront appliqués à l'ensemble de la série pour la simulation des écoulements.

### 3.6. Analyse de la sensibilité du modèle aux données d'entrée

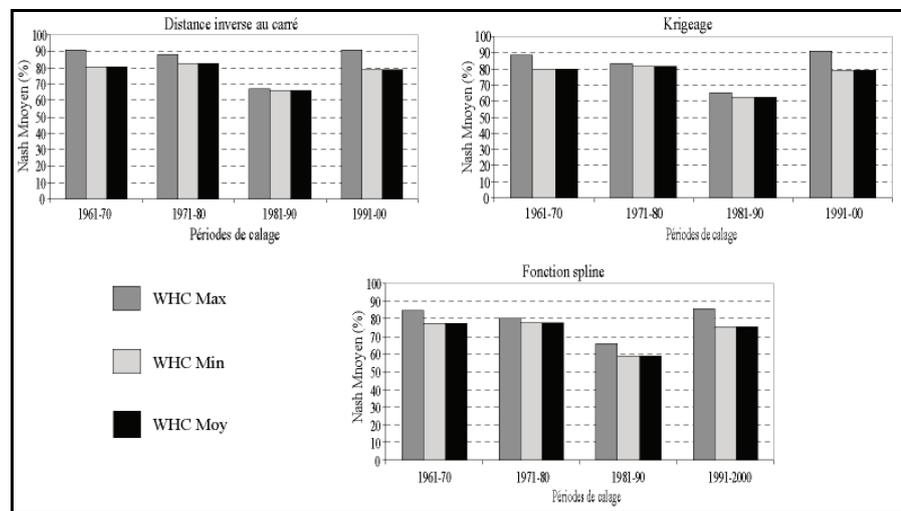
Les données disponibles pour l'application du modèle, en plus de l'ETP et des débits, sont constituées par les trois grilles de pluies obtenues par les trois différentes méthodes d'interpolation (krigeage, fonction spline et distance inverse pondérée au carré), et par les trois grilles de WHC (Max, Min, Moy). Afin de déterminer la meilleure combinaison de données d'entrée conduisant aux meilleures efficacités du modèle, nous avons testé les 9 combinaisons (3 WHC x 3 pluies).

## 4. Résultats

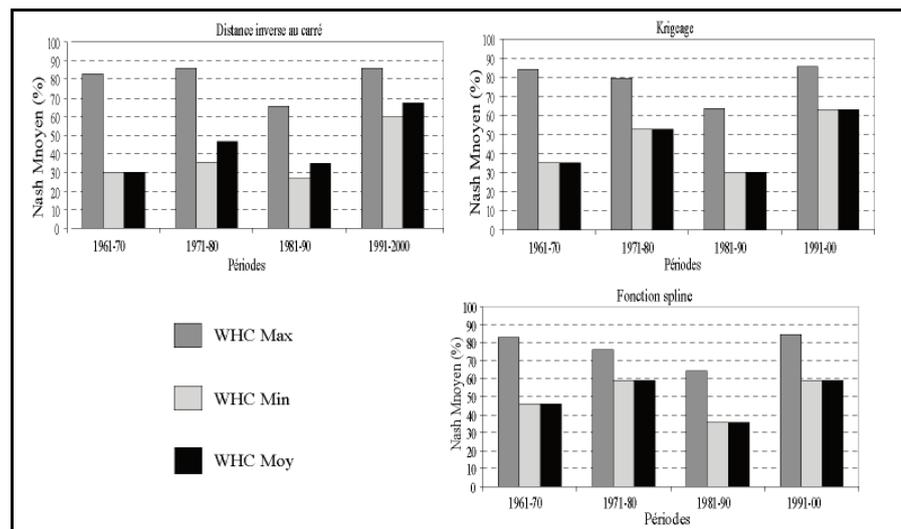
### 4.1. Analyse de la sensibilité du modèle aux données d'entrée WHC et pluie

Les figures 5 et 6 donnent les résultats obtenus sur la base de la méthodologie décrite ci-dessus avec un découpage en périodes de 10 ans. On constate ainsi que pour les bassins de Bafing Makana et de Dakka Saidou, en ce qui concerne la donnée WHC, la meilleure performance du modèle en calage et en validation est obtenue pour la grille WHC Max. Ceci est aussi valable pour un découpage en périodes de 5 ans. Dezetter *et al.* (2008) sont parvenus aux mêmes résultats sur 49 bassins situés en Côte d'Ivoire, en Guinée, au Mali, au Burkina Faso et au Niger. Pour le bassin de Sokotoro, même s'il y a un avantage pour la WHC Min en termes de performance, une comparaison des Nash obtenus en fonction du type de WHC permet de constater que la valeur du Nash moyen varie très peu, quelle que soit la grille de WHC utilisée. Cette situation est due probablement à la faible variation de la valeur WHC au niveau de ce bassin versant à cause de sa plus faible superficie.

**Figure 5 :** Performance du modèle en calage en fonction du type de WHC à Bafing Makana (découpage de 10 ans). *Model calibration depending on the WHC in Bafing Makana (over ten years period).*

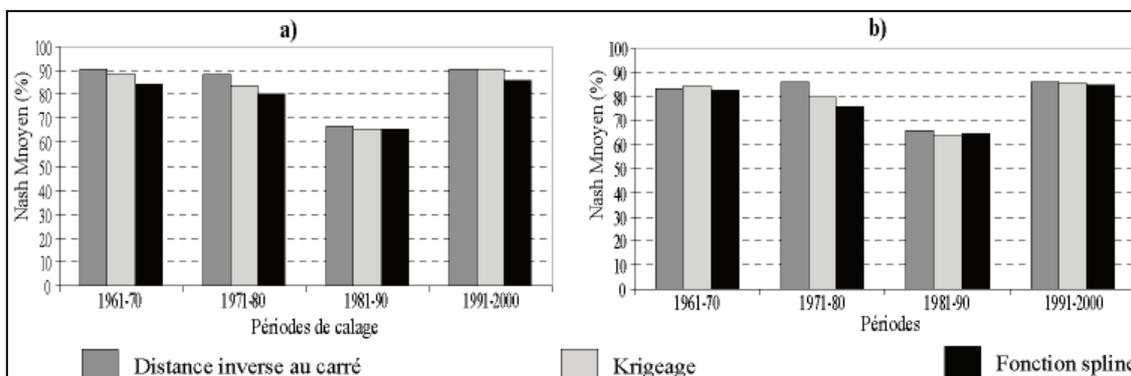


**Figure 6 :** Performance du modèle en validation en fonction du type de WHC à Bafing Makana (découpage de 10 ans) ; pour chaque jeu de paramètres sont données les performances moyennes en validation sur les autres périodes. *Skill of the model in validation mode with respect to the WHC in Bafing Makana (over ten years period), for each set of parameters average skills are given for the other validating periods.*



Pour les précipitations, la meilleure performance du modèle est obtenue par la grille de pluie générée par la méthode distance inverse pondérée au carré pour l'ensemble des découpages (figure 7). La grille de pluie générée par la fonction spline obtient le meilleur score pour le bassin de Dakka Saidou, en validation. Cependant, Tabios et Salas (1985) ont montré que le krigeage est préférable à d'autres méthodes d'interpolation pour les

précipitations, du moins quand un pas de temps mensuel est utilisé. Néanmoins, Chang *et al.* (2005) indiquent que lorsque la densité du réseau de pluviomètres est faible, à l'image de notre zone d'étude, les erreurs d'estimation peuvent être importantes avec le krigeage. Ainsi, ils ont souligné que l'interpolation par distance inverse pondérée au carré peut réduire considérablement les erreurs qui surviennent lorsque le nombre de stations est limité.



**Figure 7 :** Performance du modèle en calage (a) et en validation (b) en fonction du type de grille de pluie à Bafing Makana (WHC = WHC Max). *Model skill in calibration and validation modes with respect to rainfall grid type in Bafing Makana (WHC = WHC Max).*

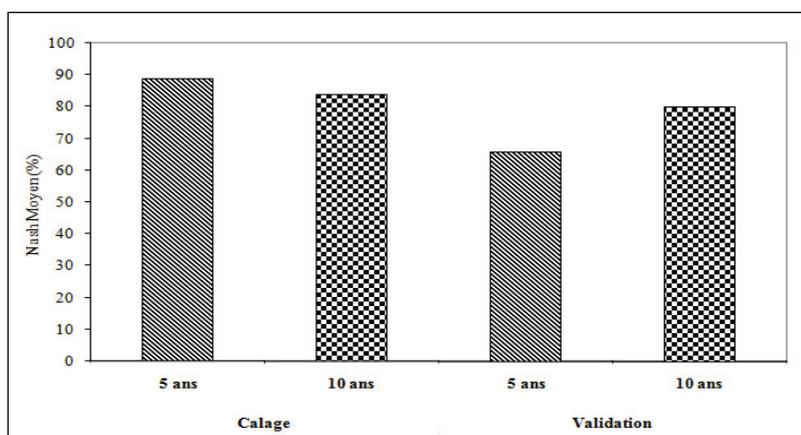
#### 4.2. Choix d'une combinaison WHC - Pluie

Compte tenu du besoin d'avoir la même méthode d'interpolation des pluies et la même grille de WHC, nous avons retenu la combinaison de la grille de WHC Max et la grille de pluie calculée par distance inverse pondérée au carré pour l'ensemble des trois bassins versant. Même si, pour le bassin de Dakka Saidou, la grille de pluie produite par fonction spline donne un score légèrement supérieur en validation.

#### 4.3. Performance du modèle en fonction des découpages

En calage, le découpage par 5 années donne les meilleurs critères de Nash à cause de l'homogénéité des séries (figure 8). En validation par contre, c'est le découpage par 10 années qui donne les meilleurs critères. En effet, il est plus facile de capturer un comportement moyen des bassins versants en utilisant un découpage décennal plutôt que quinquennal. Selon Ardoin-Bardin (2004), les périodes plus longues incluent une plus grande variabilité d'événements hydrologiques et sont représentatives de la gamme de conditions pouvant se produire sur les bassins. Les périodes plus courtes, en revanche, peuvent être très marquées par des conditions plus extrêmes rencontrées sur la période considérée.

**Figure 8 :** Performance du modèle en fonction des découpages temporels à Bafing Makana. *Model skill with respect to different periods in Bafing Makana.*



Dezetter *et al.* (2010) remarquent que sur le bassin de Koulikoro (fleuve Niger), les périodes de calage dont les paramètres conviennent le mieux, sont les périodes pour lesquelles on rencontre à la fois des années déficitaires et des années excédentaires, de manière plus ou moins équilibrée, mais pas d'années exceptionnelles. Ces mêmes remarques prévalent sur les bassins étudiés ici. Ainsi, les jeux de paramètres retenus pour la simulation des écoulements sont ceux obtenus avec le découpage de 10 ans.

#### 4.4. Performance du modèle en calage et en validation

Les valeurs du critère de Nash en calage sont, de façon générale, bonnes pour l'ensemble des trois bassins car supérieures à 0,60 (tableaux 5 à 7). Il en va de même pour le critère de Nash en validation, à quelques exceptions près. Ces dernières concernent la période 1981-1990 pour Bafing Makana et celle de 1990-1999 pour Dakka Saidou. La période 1981-1990 a la particularité de contenir, à l'échelle des bassins, des années exceptionnellement sèches (1983 et 1984) difficilement reproductibles par le modèle calé sur des périodes au comportement proche de la moyenne. Des résultats similaires ont été obtenus par Dezetter *et al.* (2010) sur le bassin du Niger à Koulikoro. Il est probable que des fonctionnements différents des bassins versants ont lieu durant ces périodes et qu'ils n'ont pas cours sur des périodes plus humides.

La validation du modèle (dernière colonne des tableaux 5 à 7) permet de pouvoir choisir le jeu de paramètres qui représente au mieux le fonctionnement du bassin versant, afin notamment de l'utiliser pour la simulation des chroniques de débits à partir des données d'entrée. Ainsi, ce sont les paramètres calés respectivement pour Bafing Makana et Dakka Saidou sur la période 1971-1980 et 1960-1969 qui représentent au mieux les autres périodes. Pour ce qui est du bassin de Sokotro, les paramètres de la période 2000-2002 reproduisent mieux les autres périodes. Ce sont les paramètres X1 et X2 de ces périodes qui ont été retenus pour l'extrapolation sur l'ensemble de la période d'étude.

Période de calage	1961-70	1971-80	1981-90	1991-00	
X1 calé	0,44	0,38	0,37	0,34	
X2 calé	0,54	0,55	0,55	0,51	
Nash calage	<b>0,90</b>	0,88	<u>0,66</u>	<b>0,90</b>	
Corrélation mensuelle	0,95	0,94	0,83	0,95	
					Moy. Nash
Nash validation 1961-70	/	0,85	0,85	0,78	0,83
Nash validation 1971-80	0,82	/	0,88	0,84	<b>0,86</b>
Nash validation 1981-90	0,59	0,67	/	0,64	<u>0,65</u>
Nash validation 1991-00	0,64	0,85	0,87	/	0,86
Moy. Nash	<u>0,69</u>	0,76	<b>0,87</b>	0,74	

**Tableau 5** : Résultats de calage et de validations croisées pour la station de Bafing Makana : valeurs des paramètres, critère de Nash et coefficient de corrélation. On applique chaque jeu de paramètres calés pour une période à toutes les autres périodes (avec définition du critère de Nash). La dernière colonne du tableau présente la valeur moyenne du critère de Nash en validation pour chaque période test et chaque jeu de paramètres respectivement. Dans le tableau, les meilleures valeurs du critère de Nash en calage et en validation sont en gras et les plus faibles valeurs en italique souligné. *Calibration and cross-validation results for Bafing Makana station: parameters, Nash criterion and correlation coefficient. We apply each set of calibrated parameters for a period to all other periods (with definition of Nash criterion). The last column and row of the table shows the average value of Nash criterion validation test for each period and each set of parameters, respectively. In the table, the best values of Nash criterion in calibration and validation are in bold and the lowest values in underlined italic.*

Période de calage	1960-69	1970-79	1980-89	1990-99	
X1 calé	0,55	0,51	0,47	0,36	
X2 calé	0,53	0,54	0,56	0,53	
Nash calage	<b>0,93</b>	0,89	<u>0,79</u>	0,91	
Corrélation mensuelle	0,96	0,94	0,89	0,95	
					Moy. Nash
Nash validation 1960-69	/	0,92	0,89	0,67	<b>0,83</b>
Nash validation 1970-79	0,88	/	0,88	0,69	0,82
Nash validation 1980-89	0,75	0,78	/	0,67	0,73
Nash validation 1990-99	0,24	0,47	0,65	/	<u>0,45</u>
Moy. Nash	<u>0,62</u>	0,72	<b>0,81</b>	0,68	

**Tableau 6** : Identique que le tableau 5, mais pour la station de Dakka Saidou. *Same as table 5, but for Dakka Saidou station.*

Période de calage	1970-76	1980-82	1984-87	2000-02	
X1 calé	0,23	0,22	0,24	0,25	
X2 calé	0,54	0,62	0,69	0,58	
Nash calage	<u>0,88</u>	0,93	0,92	<b>0,96</b>	
Corrélation mensuelle	0,94	0,97	0,96	0,98	
					Moy. Nash
Nash validation 1970-76	/	0,87	0,81	0,84	<u>0,84</u>
Nash validation 1980-82	0,92	/	0,88	0,88	0,90
Nash validation 1984-87	0,87	0,89	/	0,95	0,89
Nash validation 2000-02	0,93	0,92	0,94	/	<b>0,93</b>
Moy. Nash	<b>0,91</b>	0,89	<u>0,87</u>	0,87	

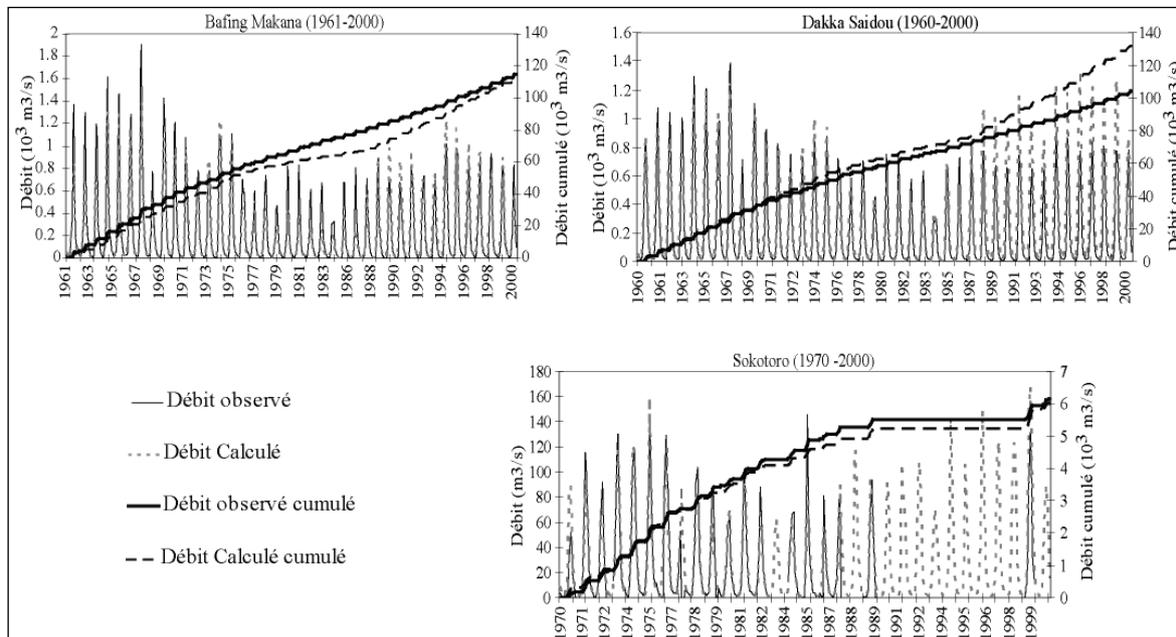
**Tableau 7** : Identique que le tableau 5, mais pour la station de Sokotoro. *Same as table 5, but for Sokotoro station.*

#### 4.5. Application du modèle GR2M et simulation des débits mensuels

Nous avons appliqué le modèle GR2M avec les paramètres préalablement sélectionnés sur l'ensemble de la série pour simuler les débits à partir de la grille de pluie moyenne mensuelle obtenue par distance inverse pondérée au carré, l'ETP moyenne mensuelle et le WHC Max. Ces trois données d'entrée ont permis d'étendre les séries de débits mensuels du bassin de Bafing Makana, Dakka Saidou et Sokotoro de 1960 à 2000. La figure 9 donne les hydrogrammes observés et simulés sur les trois bassins. Les débits mensuels maximums calculés sont bien situés dans le temps mais avec parfois des erreurs d'amplitude. Pour les étiages par contre, on observe une bonne superposition des hydrogrammes des débits observés et calculés.

Les résultats révèlent aussi que parfois les incertitudes demeurent importantes dans les simulations (figure 9). Ces incertitudes sont inhérentes à la démarche de modélisation utilisée qui n'est qu'une vision simplifiée de la complexité du fonctionnement du bassin versant (Le Lay, 2006). D'ailleurs, Kingumbi (2006) identifie quatre sources d'incertitudes dans les différences entre données mesurées sur le terrain et sorties simulées par un modèle : (1) les erreurs aléatoires ou systématiques provenant des données (précipitations, évapotranspiration, WHC) utilisées pour représenter la variation dans l'espace et le temps des entrées du système ainsi que ses conditions aux limites ; (2) les erreurs aléatoires ou systématiques dans les

données des sorties du modèle (niveaux d'eau dans une rivière, niveaux piézométriques, débits d'une rivière, etc.) ; (3) les erreurs dues à une structure incomplète ou biaisée du modèle, qui peut ne pas convenir à la représentation des phénomènes mis en jeu dans le système ; (4) les erreurs dues aux valeurs des paramètres du modèle qui peuvent ne pas être optimales.



**Figure 9** : Débits observés et calculés pour les 3 stations étudiées. *Simulated and observed discharges for the 3 studied stations.*

Dans notre étude, pour quantifier les incertitudes de simulations, une analyse statistique des résidus ( $\text{débits}_{\text{observés}} - \text{débits}_{\text{simulés}}$ ) est réalisée. Cette analyse en trois étapes consiste à examiner (i) si la moyenne des résidus est statistiquement nulle, ce qui assure des estimations sans biais ; (ii) si la moyenne des résidus est statistiquement positive, ce qui implique des estimations affectées de biais avec tendance à une surestimation des débits par le modèle ; (iii) si la moyenne des résidus est statistiquement négative, ce qui engendre des estimations affectées de biais avec une sous-estimation des débits par le modèle. Ainsi, à la station de Bafing Makana et de Sokototo, le modèle surestime les débits calculés respectivement de 9 et de 1,24 % tandis qu'à Dakka Saidou, la sous-estimation des débits calculés est de 15,7 %.

## Conclusion

Cette étude a permis de compléter et d'étendre les séries de débits mensuels du bassin de Bafing Makana, Dakka Saidou et Sokototo de 1960 à 2000. Mais force est de constater que les données des bassins de Balabori, Bébélé, Trokoto et Téliko n'ont pu être étendues à cause du caractère lacunaire de leurs données hydrométriques.

Ainsi, à la suite de ce travail, c'est la modélisation des écoulements des bassins, qui n'ont pas pu être intégrées ici faute de données hydrométriques suffisantes (surtout le bassin de Balabori qui contrôle l'ensemble des apports guinéens), qui sera privilégiée sur la base de la méthodologie développée. En effet, dans le cadre du projet GEF/BFS, l'ensemble des stations hydrométriques du haut bassin ont été rénovées par l'OMVS en 2007. Ceci doit permettre d'ici cinq années de disposer de données hydrométriques supplémentaires nécessaires au calage et à la validation du modèle GR2M pour étendre les séries de débits. En outre, cette modélisation permettra de constituer une banque de données à partir de laquelle on pourra

étudier le régime des cours d'eau en terme d'analyse fréquentielle (temps de retour de différents paramètres), de paramètres principaux de l'écoulement (les modules, les crues, les étiages, la saisonnalité, les coefficients d'écoulements, etc.), et fournir aux aménageurs des statistiques utiles pour la mise en place des d'ouvrages dits de seconde génération qui sont des barrages destinés à accroître le potentiel hydro-électrique du bassin et à réguler les affluents. Un bon calage du modèle et, par conséquent, la connaissance de ses paramètres optimisables, peuvent être bénéfiques au delà des seuls enjeux du haut bassin. En effet, ils peuvent ensuite être transposés sur des bassins versants voisins non jaugés et au comportement hydrologique similaire, permettant ainsi de donner des ordres de grandeurs sur les ressources en eau de ces bassins.

Enfin, en domaine tropical, la réponse hydrologique des bassins versants est en grande partie contrôlée par le cadre climatique (à travers précipitation et température) auquel les bassins sont soumis. Dans un contexte de changement climatique, l'étude des impacts sur les ressources en eau devient un enjeu important. Le modèle GR2M utilisé ici, a montré une certaine robustesse à simuler les écoulements de part et d'autre de la rupture statistique observée dans les séries pluviométriques. On peut donc raisonnablement envisager son utilisation en climat futur projeté par les modèles climatiques du GIEC. En effet, le développement économique des pays de l'Afrique subsaharienne repose en partie sur l'exportation des produits issus de l'agriculture (arachide, coton, cacao, café, etc.). En outre, la gestion optimale de la ressource en eau, en quantité comme en qualité, est une condition essentielle du développement durable de ces pays. Ce développement s'inscrit dans la perspective d'une croissance des besoins, associée à la forte augmentation démographique. Ainsi, il serait intéressant d'utiliser dans des travaux futurs les sorties de modèles climatiques (précipitation et température) en entrée du modèle hydrologique GR2M pour simuler les écoulements à l'échelle des bassins versants pour le siècle à venir.

## Bibliographie

ADREASSIAN V., PARENT E., MICHEL C., 2003 : A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behaviour. *Water Resour. Res.*, 39 (9), 1252, doi:10.1092/2003WR002081.

ARDOIN-BARDIN S., 2004 : *Variabilité hydro-climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélien*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 440 pages.

ARDOIN-BARDIN S., DEZETTER A., SERVAT E., BOCQUILLON C., 2001 : Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de relation pluie-débit en milieu semi-aride africain. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 333, Série IIa, 611-616.

ARDOIN-BARDIN S., DEZETTER A., SERVAT E., PATUREL J.-E., MAHÉ G., NIEL H., DIEULIN C., 2009 : Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 54, 77-89.

BAMBA F., BALDE C., 2005 : *Etude du système guinéen actuel de contrôle des ressources en eau (quantité/qualité) en général et du fleuve Sénégal en particulier*. Rapport OMVS, Dakar, 111 pages.

BODIAN A., 2011 : *Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal*. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 288 pages.

- BODIAN A., DACOSTA H., DEZETTER A., 2011 : Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. *Physio-Géo*, V, 116-133.
- BRUNET-MORET Y., 1971 : Étude de l'homogénéité de séries chronologiques de précipitation annuelles par la méthode des doubles masses. *Cahiers ORSTOM*, série hydrologie, vol. VIII, n° 4, 3-33.
- BRUNET-MORET Y., 1977 : Test d'homogénéité. *Cahiers ORSTOM*, série hydrologie, vol. XIV, n° 2, 119-129.
- CHANG C. L., LO S. L., YU S. L., 2005 : Applying fuzzy theory and genetic algorithm to interpolate precipitation. *J. Hydrol.*, 314, 92-104.
- COLY A., 1996 : *Le système fluvio-lacustre du Guiers : étude hydrologique et gestion quantitative intégrée*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, UCAD, 308 pages.
- COLY A., OULD SOUFI B., CAMARA E., DIALLO M. A., LAKH M., 2005 : *Etude comparative des systèmes utilisés par les Etats membres de l'OMVS et l'organisation elle-même avec l'utilisation du système d'indicateur mise en place à l'Observatoire de l'environnement de l'OMVS*. Rapport OMVS, Dakar, 83 pages.
- CSE, 2006 : *Etude d'impacts des feux de brousses sur l'eau, les sols et la végétation dans la partie guinéenne du bassin du fleuve Sénégal*. Rapport OMVS, Dakar, 133 pages.
- DEZETTER A., GIRARD S., PATUREL J.E., MAHE G., ARDOIN-BARDIN., SERVAT E., 2008 : Simulation of runoff in West Africa: Is there a single data-model combination that produces the best simulation results? *Journal of Hydrology*, 354, 203-212.
- DEZETTER A., PATUREL J-E., RUELLAND D., ARDOIN-BARDIN S., FERRY L., MAHE G., DIEULIN C., SERVAT E., 2010 : *Prise en compte des variabilités spatio-temporelles de la pluie et de l'occupation du sol dans la modélisation semi-spatialisée des ressources en eau du haut fleuve Niger*. In 'Global Change: facing risks and threats to water resources', proceedings of the sixth world FRIEND conference; Wallingford: IAHS, 544-552.
- DIELLO P., 2007 : *Interrelations Climat-Homme-Environnement dans le Sahel Burkinabé : impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 395 pages.
- DIEULIN C., 2005 : *Calcul des capacités en eau des sols à partir de la carte des sols de la FAO*. Note interne. UMR HydroSciences Montpellier, France.
- DIONE O., 1996 : *Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie*. Thèse de doctorat, Université Lyon 3 Jean Moulin, 477 pages.
- FAO-UNESCO., 1974-1981 : *CD Soil map of the World*. UN Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- FARR T. G., KOBRICK M., 2000 : Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. *Amer. Geophys. Union Eos*, 81, 583-585.
- KANE H., DIALLO A., 2005 : *Etude portant sur l'évaluation de l'état de l'environnement des ressources naturelles et des ressources en eau dans la partie guinéenne du bassin du fleuve Sénégal, en se servant du système d'indicateurs de l'Observatoire de l'environnement de l'OMVS*. Rapport OMVS, Dakar, 154 pages.
- KINGUMBI A., 2006 : *Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie Centrale*. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar, 300 pages.
- KOUASSI A. M., N'GUESSAN BI T. M., KOUAME K. F., KOUAME K. A., OKERINGRI J. C., BIEMI J., 2012 : Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse des

tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M : cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *C.R. Géoscience*, 344, 288-296.

LE LAY M., 2006 : *Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin*. Thèse de doctorat, INPG, LTHE, Grenoble.

MAHÉ G., PATUREL J.E., SERVAT E., CONWAY D., DEZETTER A., 2005 : Impact of land use change on soil water holding capacity and river modeling of the Nakambe River in Burkina-Faso. *Journal of Hydrology*, 300, 1-4, 33-43.

MAKHLOUF Z., MICHEL C., 1994 : A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162, 299-318.

NASH J. E., SUTCLIFFE J. V., 1970 : River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.

NONGUIERMA A., NIANG A., 2006 : *Etude cartographique de la partie guinéenne du bassin du fleuve Sénégal. Identification des besoins cartographiques et élaboration des TDR pour la cartographie et l'interprétation*. Rapport OMVS, Dakar, 85 pages.

OMVS, 2006 : *Rapport annuel sur l'état de l'environnement et des ressources naturelles du bassin du fleuve Sénégal*. 50 pages ; <http://www.riob.org/robao/communications/rapport-fleuve-senegal.pdf>.

ORANGE D., 1992 : Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest). *Sciences Géologiques*, n° 93, U.L.P., C.N.R.S., ORSTOM, 198 PAGES.

OUEDRAOGO M., 2001 : *Contribution à l'étude de l'impacte 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 Montpellier II, 257 pages.

OUEDRAOGO M., SERVAT E., PATUREL J.-E., LUBES-NIEL H., MASSON J.-M., 1998 : *Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit autour des années 1970 en Afrique de l'ouest et centrale non-sahélienne*. Proc. of the Abidjan Conf., Ivory Coast, *Water Resources Variability in Africa during the XX<sup>th</sup> Century*, 315-321.

PATUREL J.-E., SERVAT E., VASSILIADIS A., 1995 : Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M model. *Journal of Hydrology*, 168, 11-125.

PENMAN H. L., 1948 : Natural Evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings Royal Society London*, 120-145.

ROCHETTE C., 1974 : *Le bassin du Fleuve Sénégal. Monographies hydrologiques*. Orstom, 329 pages.

RUELLAND D., ARDOIN-BARDIN S., COLLET L., ROUCOU P., 2012 : Simulating future trends in hydrological regime of a large Sudano-Sahelian catchment under climate change. *Journal of Hydrology*, 424-425, 207-216.

SERVAT E., DEZETTER A., 1988 : *Simple et Rosen : deux méthodes d'optimisations non linéaires. Théorie et Pratique*. ORSTOM, Montpellier, notice OVNIh1.

TABIOS G. O., SALAS J. D., 1985 : A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resour. Res.*, 21 (3), 365-380.

WERNER M., 2001 : Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Mission overview. *J. Telecom. (Frequenz)*, 55, 75-79.