

## Impact du changement climatique sur les ressources en eau du haut bassin du fleuve Sénégal

Ansoumana **BODIAN**<sup>(1)</sup>, Alain **DEZETTER**<sup>(2)</sup>, Honoré **DACOSTA**<sup>(3)</sup> et Sandra **ARDOIN-BARDIN**<sup>(2)</sup>

(1) Laboratoire Leïdi « Dynamique des territoires et développement » Université Gaston Berger (UGB), BP 234, Saint-Louis, Sénégal, Courriel : ansoumana.bodian@ugb.edu.sn

(2) IRD, UMR HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier 2, case MSE, place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France, Courriel : Alain.Dezetter@ird.fr et Sandra.Ardoin@ird.fr

(3) Faculté des Lettres et des sciences Humaines, Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal, Courriel : honore.dacosta@ucad.edu.sn

### Résumé

La perspective du changement climatique soulève de nombreuses interrogations quant au devenir de la ressource en eau en Afrique de l'Ouest. En effet, l'eau dans ces régions est un élément déterminant pour de multiples activités humaines telles que l'agriculture, la production d'électricité ou encore l'alimentation en eau potable. Dans ce contexte, cet article propose une évaluation de l'impact du changement climatique sur les écoulements du haut bassin du fleuve Sénégal aux stations hydrométriques de Sokotoro, Dakka Saidou et Bafing Makana. La méthodologie appliquée se résume comme suit : (i) proposition de scénarios de température et/ou de précipitations basés sur les sorties de modèles climatiques ; (ii) modélisation des hydrosystèmes étudiés ; (iii) analyse de la réponse de ces hydrosystèmes sous contraintes climatiques ; (iv) conclusion sur la sensibilité de ces hydrosystèmes aux futures conditions climatiques. L'exploitation des résultats de ces simulations permet de déterminer comment les écoulements des bassins versants seront affectés par des modifications du climat à moyen (horizons 2030-2060) et à long termes (horizon 2090). Pour ce faire, les sorties de quatre modèles climatiques du rapport de IPCC 2007 (CSMK3, HadCM3, MPEH5 et NCPCM), avec le scénario d'évolution de gaz à effet de serre SRES-A2, sont utilisées en entrée du modèle hydrologique GR2M afin de simuler les écoulements à l'échelle des bassins versants pour le siècle à venir. Une comparaison, intermodèles climatiques, des taux de variation des modules annuels aux différents horizons permet de constater que les modèles CSMK3, HADCM3 et MPEH5 présentent une similarité de prévisions pour les trois bassins. Ainsi, on assiste à une diminution progressive des écoulements de l'horizon 2030 à l'horizon 2090. Le modèle NCPCM se démarque des autres modèles climatiques et prévoit une augmentation progressive des écoulements de l'horizon 2030 à l'horizon 2090 sur l'ensemble des trois bassins. Ce dernier modèle est le plus optimiste quant à la prévision des écoulements futurs dans le haut bassin du fleuve Sénégal.

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

## Abstract

### Impact of climate change on water resources of the Upper basin of the Senegal River

The perspective of climate change today raises many questions on the evolution of water resources in western Africa. Indeed, water in these regions is a key aspect for the various human activities such as agriculture, power production or water supply. In this context, this article proposes an evaluation of the impact of climate change on flows in the upper basin of the Senegal River, at the Sokotoro, Dakka Saidou and Bafing Makana gauging stations. The adopted methodology can be summarized as follows: (i) proposing temperature and/or precipitation scenarios based on climate models outputs; (ii) modelling the studied hydrosystems; (iii) analyzing the response of these hydrosystems under climate constraints; (iv) concluding on the sensitivity of these hydrosystems to future climate conditions. The results of these simulations provide an assessment of the extent to which flows in these catchments will be affected by climate modifications on the medium (2030-2060 time slice) and long term (by 2090). To this end, the outputs of four climate models from the 2007 IPCC report (CSMK3, HadCM3, MPEH5 and NCPCM), with a SRES-A2 greenhouse gas emission scenario were used as input to the GR2M hydrological model, to simulate flows at the catchment scale for the XXI<sup>st</sup> century. A comparison of the variation rates of mean annual flows between climate models for the various time slices shows that the CSMK3, HADCM3 and MPEH5 models provide similar projections for the three catchments, with a progressive decrease of flows from 2030 to 2090. The NCPCM model shows a different behaviour and simulates a progressive increase of flows from 2030 to 2090 on the three catchments. This last model is the most optimistic regarding the projection of future flows in the upper basin of the Senegal River.

**Keywords:** Upper basin of the Senegal River, rainfall-runoff modelling, water resources, climate models, GR2M

## 1. Introduction

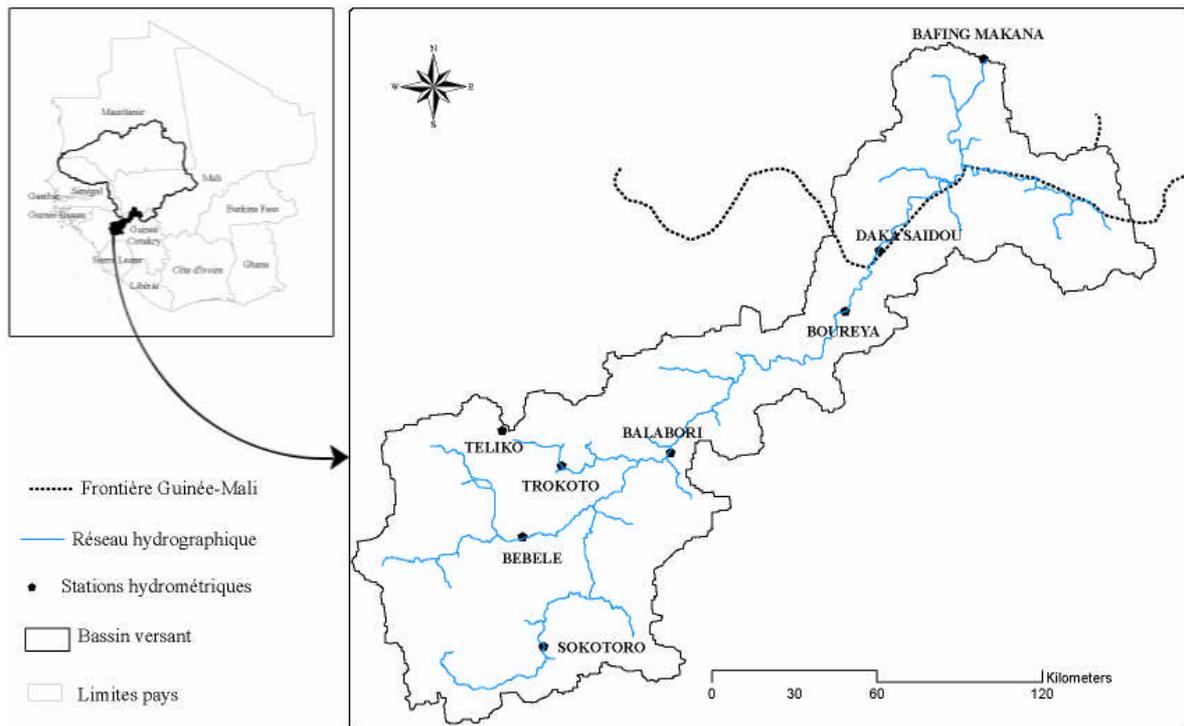
En domaine tropical, la réponse hydrologique des bassins versants est en grande partie contrôlée par le cadre climatique (à travers précipitation et température) auquel les bassins sont soumis. Dans ces régions, l'étude des impacts du changement climatique sur les ressources en eau est un enjeu important. En effet, le développement économique de ces régions repose majoritairement 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, dans cet article, les sorties de quatre modèles climatiques (précipitation et ETP) sont utilisées en entrée du modèle hydrologique GR2M, dont la robustesse à simuler les écoulements en contexte africain a été démontrée (PATUREL J.E *et al.*, 1995 ; OUEDRAOGO M *et al.*, 1998 ; ARDOIN-BARDIN S *et al.*, 2009; MAHE G *et al.*, 2002 ; MAHE G *et al.*, 2005; BODIAN A *et al.*, 2012) afin de simuler les écoulements à l'échelle des bassins versants pour le siècle à venir. L'exploitation des résultats

de ces simulations permet de déterminer dans quelles mesures les écoulements des bassins seront affectés par des modifications du climat à moyen terme (horizon 2030-2060) et à long terme (horizon 2090). Un travail similaire a été effectué par ARDOIN-BARDIN *S et al.*, (2005 ; 2009) en se fondant sur les données du modèle climatique HadCM3 de 2001 assorti du scénario d'évolution de gaz à effet de serre SRES-A2 sur les bassins de Bafing Makana et de Dakka Saidou. Ces travaux ont permis d'élaborer une méthodologie nécessaire à la prévision des changements climatiques et de leurs impacts sur les ressources en eau. Cependant, aucun bassin guinéen n'a été intégré dans son étude. Ainsi, ce travail permet d'avoir une idée des impacts potentiels du changement climatique sur l'évolution des ressources en eau d'un bassin guinéen du fleuve Sénégal, compte tenu de l'importance de ce bassin guinéen où se forme la plus grosse partie des écoulements du fleuve Sénégal. En outre, la publication en 2007 du Fourth Assessment Report de l'IPCC nécessite une analyse des nouveaux résultats de simulation et de les comparer aux précédents afin de souligner les différences ou les similitudes entre les prévisions. Enfin, les outils de modélisation des changements climatiques étant nombreux, il est aussi intéressant d'utiliser plusieurs modèles climatiques afin de comparer les résultats obtenus avec chaque modèle climatique et d'obtenir une fourchette des possibilités d'évolution des ressources en eau.

## 2. Zone d'étude

Le cadre d'étude est le haut bassin du fleuve Sénégal et concerne sept stations hydrométriques (tableau 1). Cet espace se situe entre les latitudes 10°30' et 12°30' N et les longitudes 12°30' et 9°30' W et 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). Cet espace naturel est presque essentiellement centré sur les massifs montagneux du Fouta-Djalon en Guinée, source des principaux écoulements en Afrique de l'Ouest, sur les collines et plateaux qui leur font suite vers le Nord au Mali. Les valeurs des différentes variables physiographiques, calculées à partir des données SRTM 90 m de la NASA, pour chaque bassin versant sont consignées dans le tableau 1. Les indices de pente globale consignés dans ce tableau tout comme les indices de pente de Roche et la dénivelée spécifique sont assez fortes pour l'ensemble des bassins. D'une manière générale, les pentes décroissent de l'amont vers l'aval, traduisant ainsi l'importance du volume montagneux du Fouta Djalon et la forte incision du relief. On constate, par ailleurs, que l'ensemble du bassin se range dans les classes d'altitude forte à très forte. Du point de vue climatique, le cadre est régi par la circulation de l'atmosphère induite par les anticyclones des Açores (Océan Atlantique) et libyen en hémisphère boréal, et l'anticyclone de Sainte Hélène dans l'Océan Atlantique austral. Les facteurs climatiques et le climat résultant, s'expliquent par les déplacements du Front Intertropical (FIT) qui sépare les flux d'alizé (maritime et continental), émis par les anticyclones des Açores et la cellule libyenne, et le flux de mousson provenant de l'anticyclone de Sainte Hélène. Ces deux flux se différencient par leur humidité qui permet de diviser l'année en deux saisons bien distinctes : une saison sèche et une saison humide.

**Figure 1 : Localisation du haut bassin et des stations hydrométriques**



Les valeurs des différentes variables physiographiques pour chaque bassin versant étudié (figure 1) sont synthétisés au tableau 1.

**Tableau 1 : Synthèse des variables physiographiques du haut bassin et de ses sous-bassins (Kc : indice de compacité de Gravélius ; 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) : dénivelée spécifique)**

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	21290	1092	2.09	468.3	45.5	1.70	2.3	1389	215	336
<b>Daka Saidou</b>	Bafing	15660	868	1.94	218.5	71.7	2.48	4.95	1389	306	619
<b>Balabori</b>	Bafing	10910	478.9	1.28	157.5	69.2	2.66	5.68	1358	463	593
<b>Bébéle</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

### 3. Données et outils

**Données climatiques.** Les données climatiques (pluie et ETP) à l'échelle mensuelle spatialisées sous la forme de grilles au demi degré carré sont disponibles auprès du Climatic Research Unit (CRU) de l'Université d'East Anglia (NEW M *et al.*, 1999 ; 2000). Ces données ont été constituées par interpolation des données mensuelles disponibles aux stations avec une fonction Spline. Elles couvrent respectivement la période 1950-1998 pour les pluies et la période 1950-1995 pour les données d'ETP, calculées selon la formule PENMAN H.L (1948).

**Caractéristiques des sols.** Le remplissage maximal du réservoir « sol » du modèle hydrologique GR2M correspond à la capacité en eau du sol dont les données sont estimées à partir de la carte des sols diffusée par la FAO (Fao-Unesco, 1974-1981). En effet, la FAO en s'appuyant sur la granulométrie du sol, le couvert végétal, les valeurs de la profondeur racinaire et les valeurs limites de succion, a défini sept classes (A à F) de capacité en eau (tableau 2), auxquelles elle ajoute une dernière classe correspondant aux « Zones Humides » ou Wetlands. Ces données de capacité de rétention en eau du sol ont été fournies par HydroSciences Montpellier sous la forme de grilles à la résolution du demi-degré carré (DIEULIN C, 2005).

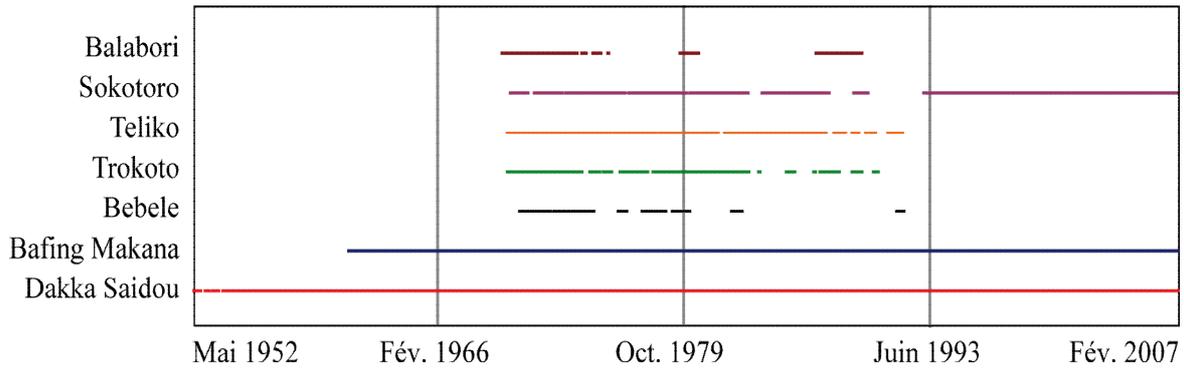
**Tableau 2 : Classification des sols selon la capacité de rétention en eau**

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 ( <i>Wetlands</i> )	Non Communiqué

**Source : Fao-Unesco (1974-1981)**

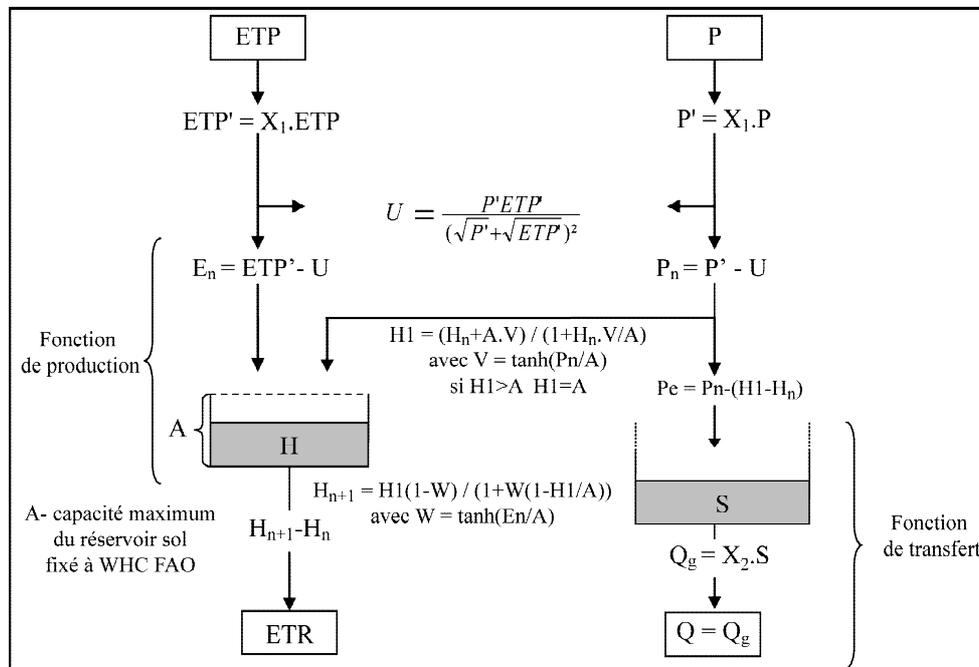
**Données hydrométriques.** Les chroniques de débits utilisées ici proviennent de la banque de données de l'OMVS. La figure 2 donne un chronogramme des données disponibles, illustrant le caractère très lacunaire des données de certaines stations hydrométriques : Balabori, Bébélé, Téliko et Trokoto. Celles-ci 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 hydrométriques pour son calage et sa validation mais aussi pour produire des résultats robustes. Dans le cadre de ce travail, nous avons décidé de travailler avec les stations qui disposent d'au moins cinq années de données complètes.

**Figure 2 : Chronogramme des débits mensuels disponibles**



**Modèle hydrologique.** Nous utilisons une version semi-globale du modèle GR2M (MAKHLOUF Z. et MICHEL C., 1994) mise au point par OUEDRAOGO M. (2001) puis reprise par ARDOIN-BARDIN S. (2004) dans le cadre du programme VAHYNE (analyse de la VARIabilité HYdrologique et impacts sur les ressources eN Eau) de l'IRD. Cette version du modèle contient deux paramètres libres à caler : X1 et X2. X1 intervient dans la partie « fonction de production » qui englobe le réservoir sol de capacité WHC du modèle alors que X2 intervient dans la partie « fonction de transfert ». Ces deux paramètres sont déterminés pour l'ensemble du bassin versant. La présente le schéma conceptuel du modèle. Les données d'entrées spatialisées sont l'ETP et la pluie mensuelle ainsi que la capacité de rétention en eau du sol (WHC).

**Figure 3 : Schéma conceptuel du modèle GR2M**



**Modèles climatiques.** Quatre modèles climatiques (CSMK3, HadCM3, MPEH5 et NCPCM) du rapport de IPCC de 2007 de type AOGCM (Atmosphere and Ocean coupled General Circulation Model) ont été choisis parmi les modèles existants dans la littérature.

Ce choix est motivé par la grande utilisation de ces modèles pour les projections climatiques et la disponibilité des données. Les caractéristiques de ces modèles sont résumées au tableau 3.

**Tableau 3 : Caractéristiques des GCM utilisés**

Modèles	Institutions - Pays	Résolution atmosphérique	Equivalence avec l'IPCC en 2001
<b>CSMK3</b> (CSIRO-MK3.0)	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Atmospheric Research, Australie	1,9°×1,9°	CSIRO_MK2
<b>HadCM3</b> (UKMO-HadCM3)	Hadley Center for Climate Prediction and Research/Met Office, Royaume-Uni	2,5°×3,75°	HADCM3
<b>MPEH5</b> (ECHAM5/MPI-OM)	Max Planck Institute for Meteorology, Allemagne	1,9°×1,9°	ECHAM4/OPYC3
<b>NCPCM (PCM)</b>	National Center for Atmospheric Research, USA	2,8°×2,8°	NCAR_PCM

Source : IPCC (2007a)

#### 4. Méthodologie

La méthode adoptée procède : (i) à l'élaboration de scénarios climatiques, (ii) au calage/validation croisés du modèle pour le choix des jeux de paramètres qui traduisent le mieux la transformation de la pluie en débit, (iii) à la simulation des écoulements futurs en utilisant les jeux de paramètres choisis.

**Élaboration de scénarios climatiques.** La simulation des débits futurs, nécessite en entrée du modèle hydrologique l'utilisation de variables simulées par des modèles climatiques. Les projections de ces variables climatiques (précipitations et d'ETP) sont produites par de nombreux GCM. Cependant ARDOIN-BARDIN S *et al.*, (2009) ont montré que les modèles climatiques semblent atteindre leurs limites là où les précipitations sont faibles (zone sahélienne) et là où se produisent deux saisons des pluies (zone guinéenne). Ainsi, ils ne parviennent pas à reproduire correctement le climat observé sur l'Afrique de l'Ouest, tant en termes de variabilité interannuelle qu'en termes de volumes précipités. De ce fait, IPCC recommande d'établir des scénarios climatiques en utilisant les champs de variation entre le climat futur et une période de référence. Ainsi, comme nous l'avons mentionné dans l'introduction ARDOIN-BARDIN S *et al.*, (2009) ont développé une méthodologie pour l'élaboration de scénarii climatique. Cette méthodologie se résume comme suit : les différences entre les précipitations et les températures représentatives de la période de référence (1961-1990) et du climat futur (horizon 2080-scénarios SRES-A2) sont calculées et exprimées en taux de variation en fonction d'une climatologie moyenne tirée des simulations du modèle climatique considéré sur la même période de référence. Ces taux de variation sont

ensuite appliqués à une série chronologique fictive, obtenue par simple tirage aléatoire dans la période de référence. On se référera aux travaux de ARDOIN-BARDIN S. *et al.*, (2009) pour plus de précision sur la méthode d'élaboration des scénarii climatiques.

**Mise en œuvre du modèle GR2M.** Avant d'utiliser GR2M pour la projection des écoulements futurs, nous avons procédé à une phase de calage-validation croisé par période de 10 ans afin de déterminer les paramètres qui traduisent le mieux la transformation de la pluie en débit. Cependant, ce découpage en périodes de 10 ans n'a pu être effectué avec le bassin de Sokotoro à cause de la qualité des données hydrométriques disponibles, un découpage en périodes de 5 ans a donc été retenu pour ce bassin. L'ajustement du modèle est réalisé successivement pour chaque période par calage automatique (enchaînement des procédures d'optimisation de Rosenbrock et du Simplex ; SERVAT E et DEZETTER A, 1988) puis le modèle est validé pour toutes les autres périodes. La qualité de la validation croisée est évaluée à l'aide du critère de NASH J. E. et SUTCLIFFE J. V. (1970). Le critère de NASH-SUTCLIFFE, noté Nash dans la suite, est d'usage courant en hydrologie et il est défini de la manière suivante :

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

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 J. E. et SUTCLIFFE J. V., 1970). Il varie de  $-\infty$  à 1. Le modèle ajusté est d'autant meilleur que cette fonction objective est proche de 1. Un critère Nash inférieur à 0.6 est l'indication d'un modèle défaillant sur le bassin (ARDOIN-BARDIN S., 2004).

**Simulation des écoulements futurs et calcul des changements.** Une fois les paramètres qui traduisent au mieux la relation pluie-débit choisie, ces derniers sont utilisés avec les scénarii climatiques élaborés pour la simulation des écoulements pour le siècle à venir. On suppose que la relation pluie-débit reste identique à celle formulée dans le modèle hydrologique, calé avec les séries chronologiques observées. Ensuite, les taux de variation annuelle sont calculés aux horizons 2030, 2060 et 2090. Puis, nous avons calculé les débits moyens mensuels aux trois horizons pour les comparer aux débits mensuels observés afin d'appréhender les impacts des changements climatiques sur les régimes hydrologique des bassins versants.

## 5. Résultats

**Performance du modèle GR2M.** Les tableaux 4 à 6 présentent les résultats de la modélisation en calage et en validation pour les trois bassins. Les cinq premières lignes des tableaux présentent les résultats des calages, viennent ensuite les validations croisées. On applique chaque jeu de paramètres calés pour une période à toutes les autres périodes, la valeur de Nash ainsi obtenue figure dans ces tableaux. La dernière colonne et ligne des tableaux présentent la valeur moyenne du critère de Nash en validation pour chaque période test et chaque jeu de paramètres respectivement. Dans les tableaux, les meilleures valeurs du critère de Nash en calage et en validation sont en gras et les plus faibles valeurs en italique souligné.

Le calage et la validation du modèle 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. La dernière ligne des tableaux ci-dessous permettent de choisir ce jeu de paramètres. Ainsi, ce sont les paramètres calés respectivement pour Bafing Makana et Dakka Saidou sur la période 1971-1980 et 1980-1989 qui représentent au mieux les autres périodes. Pour ce qui est du bassin de Sokotoro, les paramètres de la période 1970-1976 reproduisent mieux les autres périodes. Ce sont ces paramètres qui seront utilisés pour la simulation des écoulements futurs. La figure 4 donne les résultats des simulations des débits avec les paramètres préalablement sélectionnés sur l'ensemble de la série des données observées. Globalement, cette figure montre que le modèle reproduit d'une manière satisfaisante la forme des hydrogrammes observés. Les débits de pointes 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.

**Tableau 4 : Résultats de calage et de validations croisées pour la station de Bafing Makana : valeurs des paramètres, critère de Nash et coefficient de corrélation**

Période de calage	<b>61-70</b>	<b>71-80</b>	<b>81-90</b>	
X1 calé	0.302	0.259	0.252	
X2 calé	0.599	0.603	0.610	
Nash Calage	93.4	93.8	<b>94.5</b>	
Correlation Mensuelle	0.968	0.97	0.973	
				Moy Nash
Nash Valid. (p 61-70)		88.8	87.1	<u>88</u>
Nash Valid. (p 71-80)	86.3		93.6	<b>90</b>
Nash Valid. (p 81-90)	83.2	94.3		88.7
Moy Nash	<u>84.8</u>	<b>91.5</b>	90.4	

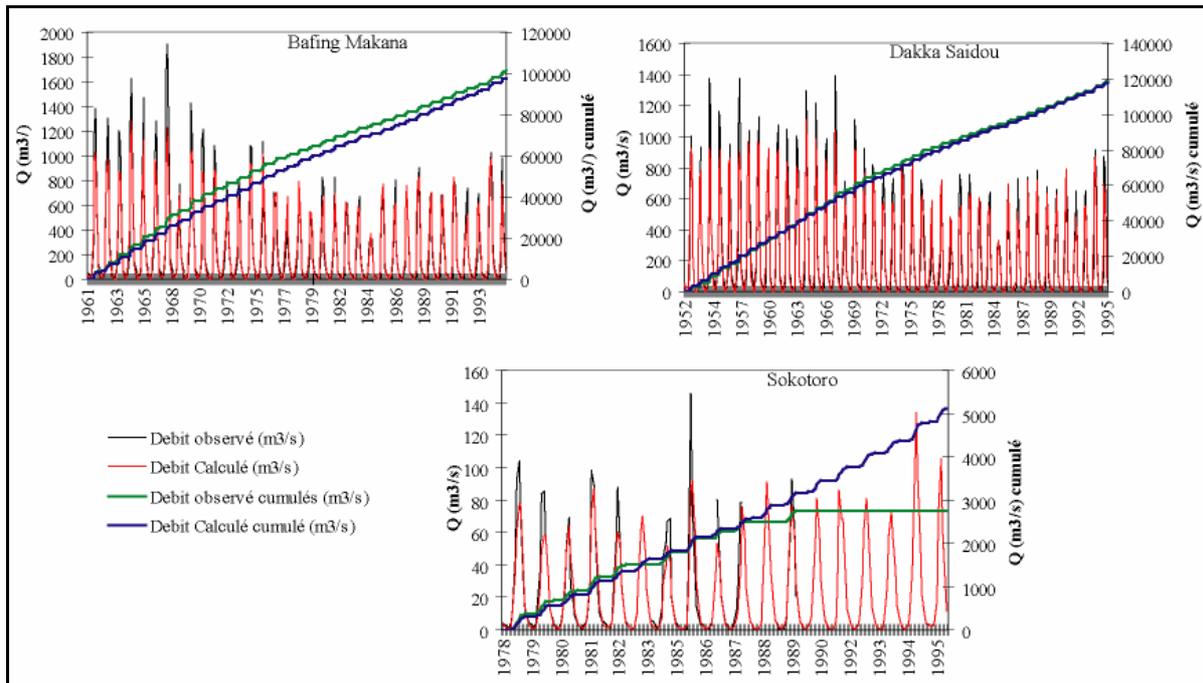
**Tableau 5 : Résultats de calage et de validations croisées pour la station de Dakka Saidou : valeurs des paramètres, critère de Nash et coefficient de corrélation**

Période de calage	<b>69-69</b>	<b>70-79</b>	<b>80-89</b>	
X1 calé	0.317	0.295	0.288	
X2 calé	0.592	0.590	0.634	
Nash Calage	<b>94.8</b>	93.9	92.4	
Correlation Mensuelle	0.975	0.971	0.962	Moy Nash
Nash Valid. (p 60-69)		93.7	93.3	<b>93.5</b>
Nash Valid. (p 70-79)	92.5		93.6	93.1
Nash Valid. (p 80-89)	90.5	92.1		<u>91.3</u>
Moy Nash	<u>91.5</u>	92.9	<b>93.5</b>	

**Tableau 6 : Résultats de calage et de validations croisées pour la station de Sokotoro : valeurs des paramètres, critère de Nash et coefficient de corrélation**

Période de calage	<b>70-76</b>	<b>80-82</b>	<b>84-87</b>	
X1 calé	0.196	0.180	0.182	
X2 calé	0.569	0.677	0.882	
Nash Calage	86.8	<b>95.1</b>	91.8	
Correlation Mensuelle	0.931	0.976	0.964	Moy Nash
Nash Valid. (p 70-76)		84.7	76.9	<u>80.8</u>
Nash Valid. (p 80-82)	92.6		90	<b>91.3</b>
Nash Valid. (p 84-87)	86.4	88.4		87.4
Moy Nash	<b>89.5</b>	86.6	<u>83.5</u>	

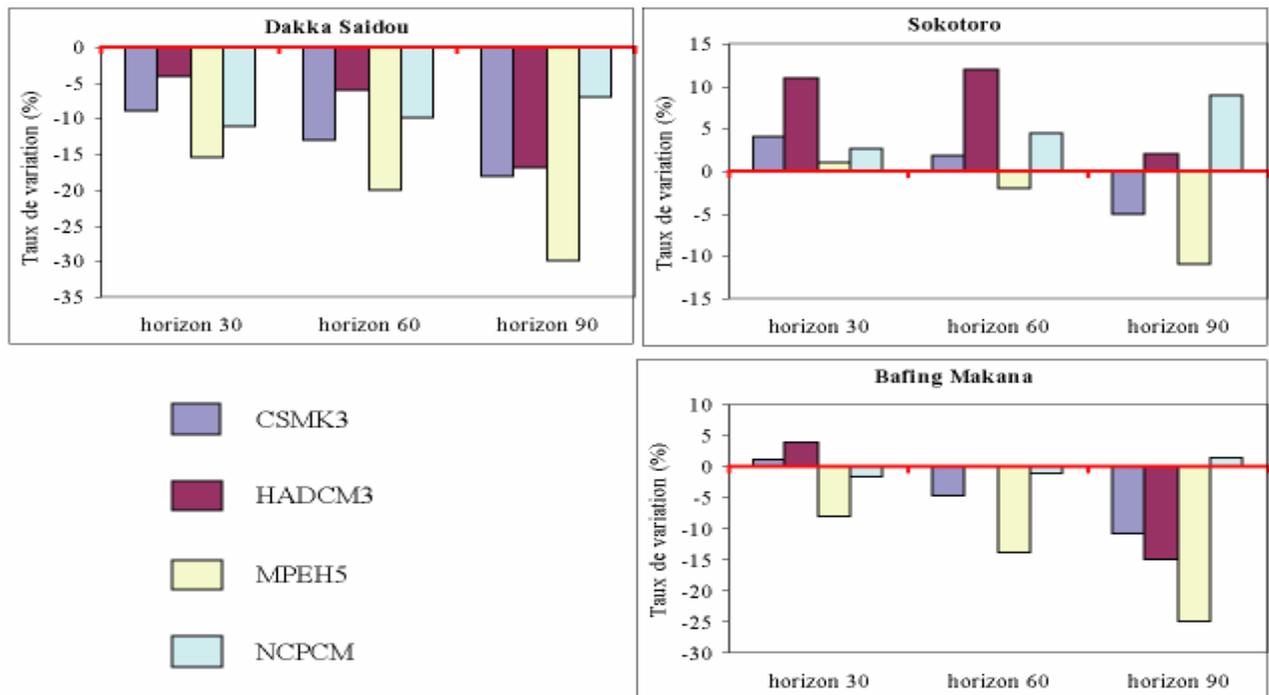
Figure 4: Débits observés et calculés



**Taux de variation des écoulements moyens annuels.** L'analyse de la figure 5 montre qu'au niveau du bassin de Bafing Makana, on observe à l'horizon 2030 une augmentation des débits moyens annuels par rapport à ceux observés pour les deux modèles climatiques que sont CSMK3 et HADCM3. Par contre, les modèles MPEH5 et NCPCM prévoient une diminution des écoulements pour ce même horizon. Aux horizons 2060 et 2090, les quatre modèles prévoient une diminution des écoulements à l'exception du modèle NCPCM, qui prévoit une légère augmentation des écoulements. À Dakka Saidou, les quatre modèles prévoient une diminution des écoulements pour les trois horizons (2030, 2060 et 2090). Les taux de variation les plus importants (30 %) sont obtenus avec le modèle MPEH5. Dans le bassin de Sokotoro, on obtient des résultats variables selon les modèles. Ainsi, les modèles HADCM3 et NCPCM prévoient une augmentation des débits moyens annuels variant de 2,2 % à 11 % aux trois horizons.

Mais force est de constater que même si de manière générale, on a une augmentation des écoulements pour le modèle HADCM3, les écoulements aux horizons 2090 sont déficitaires par rapport aux horizons 2030 et 2060. Le modèle CSMK3 prévoit une diminution de -4.17 % des écoulements à l'horizon 2030 puis une faible augmentation de 1,33 % à l'horizon 2060 et une diminution de -5 % à l'horizon 2090. Quant au modèle MPEH5, il prévoit une augmentation progressive des écoulements aux trois horizons allant de 2.33 % à l'horizon 2030 à 8.67 % à l'horizon 2090.

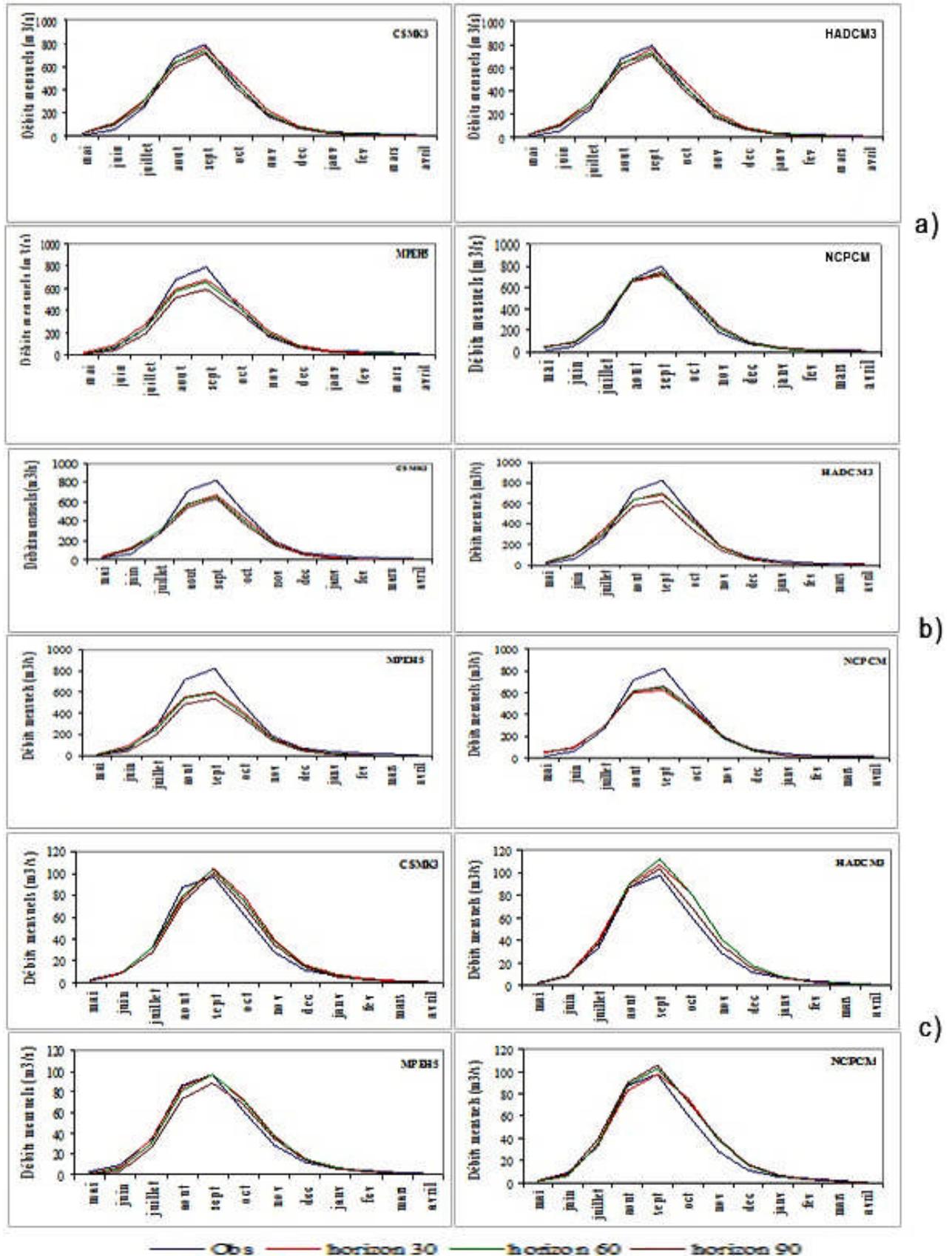
**Figure 5: Taux de variation des modules annuels aux horizons 2030, 2060 et 2090**



**Évolution des débits moyens mensuels.** La figure 6 illustre les hydrogrammes moyens calculés aux trois horizons 2030, 2060 et 2090 en comparaison avec les données observées. Elle permet de voir si les variations annuelles observées plus haut s'accompagnent d'une modification des régimes hydrologiques. La correspondance entre les hydrogrammes moyens calculés aux trois horizons et les données observées est assez bonne. Le mois où se produisent les pics de crues restent août et septembre selon les bassins versants quel que soit l'horizon considéré. Les périodes de crues et de basses eaux restent identiques à celles observées. Les modifications portent essentiellement sur les volumes écoulés. Ainsi, globalement on assiste à une diminution des volumes écoulés pour l'ensemble des modèles climatiques pendant le mois d'août et de septembre, correspondant au maximum hydrologique.

Cette baisse des volumes écoulés est plus prononcée à Dakka Saidou qu'à Bafing Makana. Contrairement aux observations faites, sur les bassins de Bafing Makana et de Dakka Saidou, on assiste à Sokotero, bassin qui est beaucoup plus en amont, à une augmentation des volumes écoulés par rapport aux données observées. Cependant, cette augmentation des volumes écoulés varie selon le modèle climatique (figure 6).

Figure 6 : Hydrogrammes moyens mensuels aux horizons 2030, 2060 et 2090, comparés aux débits observés dans le bassin de (a) Bafing Makana, (b) Dakka Saidou et (c) Sokotoro



## 6. Discussions et conclusions

Cette étude vise essentiellement à donner une idée sur les impacts potentiels d'un changement climatique sur l'évolution future des ressources en eau du haut bassin. Ainsi, les sorties (précipitations et ETP) de quatre modèles climatiques du rapport de IPPC de 2007 sous influence du scénario SRES A2 sont utilisées en entrée du modèle hydrologique GR2M pour simuler les écoulements au cours du siècle à venir. Les résultats obtenus permettent de constater que les modèles CSMK3, HADCM3 et MPEH5 présentent une similarité de prévisions pour les trois bassins. On assiste à une diminution progressive des écoulements de l'horizon 2030 à l'horizon 2090. Le modèle NCPCM se démarque des autres modèles climatiques et prévoit une augmentation progressive des écoulements de l'horizon 2030 à l'horizon 2090 sur l'ensemble des trois bassins. Ce dernier modèle est le plus optimiste quant à la prévision des écoulements futurs dans le haut bassin du fleuve Sénégal.

Cependant, ces résultats obtenus doivent être maniés avec beaucoup de précaution en raison de quelques difficultés inhérentes aussi bien à la modélisation hydrologique qu'aux incertitudes issues des modèles climatiques. En effet, le modèle GR2M en plus des données climatiques, que sont la pluie et l'ETP, nécessite aussi des données de capacité en eau du sol comme paramètres d'entrée. Si les données de prévision des deux premiers paramètres (précipitation et ETP) sont fournies par les sorties des modèles climatiques, aucune prévision n'est disponible pour la capacité de rétention en eau des sols. Dans ces conditions et pour la prévision des écoulements sur le haut bassin, nous avons fait l'hypothèse de la conservation de la capacité de rétention en eau des sols dans une situation voisine de leur état actuel, c'est-à-dire au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle. Ceci est simplificateur, car dans un contexte où le comportement des populations est difficile à prévoir associé à une température croissante, le couvert végétal des bassins versants risque de changer de manière significative. Cette modification des états de surface s'exprime par une variation de la capacité en eau du sol. À cet égard, DRAY A (2001) et MAHÉ G *et al.*, (2002) ont montré que la performance du modèle GR2M est sensible aux variations des caractéristiques physiques des bassins versants, comme la variabilité des types de sols, de végétation et de l'utilisation des sols. De surcroît, il faut également tenir compte des difficultés associées au transfert des paramètres calés sur des périodes autres que celles qui ont servi au calage.

En effet, les valeurs des paramètres dépendent dans une certaine mesure des caractéristiques hydroclimatiques de la période de calage ; et dans un contexte de changement climatique, on peut s'interroger sur la fiabilité des jeux de paramètres obtenus avec les données hydrométéorologiques du climat actuel. En outre, les modèles climatiques existants ne sont pas capables de reproduire les précipitations observées avec un niveau de fiabilité suffisant (ARDOIN-BARDIN S, 2004). Connaissant les limites des modèles climatiques et les incertitudes liées aux données générées, il est recommandé de ne pas utiliser directement les sorties de modèles climatiques mais plutôt d'utiliser les tendances générales afin de bâtir des scénarii climatiques plus réalistes à l'échelle du secteur étudié. Ainsi, la méthode des « horizons » dont les principes ont été rappelés plus haut, a été utilisée pour générer des grilles de précipitations et d'ETP mensuelles utilisées dans le modèle hydrologique. Cette procédure de correction des données issues des modèles climatiques a été effectuée en

utilisant comme données de référence la grille du CRU. Cependant, du fait du faible nombre de stations sur l'Afrique de l'Ouest, utilisées pour l'élaboration de cette grille, il peut y avoir un biais dans l'estimation des précipitations (AFFOGNITODE C., 2008).

Compte tenu de toutes ces contraintes, les résultats obtenus ne peuvent pas être présentés en termes de prévision. Il est important alors de les considérer comme une approche sur l'évolution de la ressource en eau en termes de risque sous des hypothèses particulières de changements de climat.

## Références bibliographiques

AFFOGNITODE C. (2008) : *Quels changements climatiques pour l'Afrique de l'Ouest et quels impacts sur la ressource en eau ?* Mémoire de Stage de Master II, Université de Montpellier II, 45 p.

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 p.

ARDOIN-BARDIN S., DEZETTER, A., SERVAT E., MAHE G., PATUREL J.-E., DIEULIN C. et CASENAVE L. (2005) : Évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Proceedings of symposium S6 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005. IAHS Publ. **296**, 194-202

ARDOIN-BARDIN, S., DEZETTER, A., SERVAT, E., PATUREL, J.-E., MAHÉ, G., NIEL, H et 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/Journal des Sciences Hydrologiques, **54**, 77-89.

BODIAN A., DACOSTA H. et DEZETTER A. (2011) : Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. Physio-Géo -Géographie Physique et Environnement, 2011, volume **V**, 116-133.

BODIAN A. ; DEZETTER A. ; DACOSTA H., 2012 : Apport de la modélisation hydrologique pour la connaissance de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal. *Climatologie*, vol. **9** (2012), 109-125.

DEZETTER, A., PATUREL, J.-E., RUELLAND, D., ARDOIN-BARDIN, S., FERRY, L., MAHE, G., DIEULIN, C et 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, Publ. **340**, 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 p.

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.

DRAY, A., (2001) : *Prise en compte de l'évolution de l'occupation du sol dans la modélisation des écoulements du Nakambé à Wayen (Burkina Faso)*. Rapport de stage ENSAR-IRD, 86 p.

- FAO-UNESCO (1974-1981): *Soil Map of The World*. UN Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. CD-Rom.
- IPCC, 2007a. Climate change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
- IPCC, 2007b. Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed. Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E.) Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 p.
- MAHÉ, G., PATUREL, J.-E., SERVAT, E., CONWAY, D et DEZETTER, A. (2005): Impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling of the Nakambe River in Burkina-Faso. *J. Hydrol.* **300** (1-4), 33-43.
- MAKHLOUF, Z. et MICHEL, C. (1994): A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *J. Hydrol.* **162**, 299-318.
- NASH, J. E. et SUTCLIFFE, J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles. *J. Hydrol.* **10**, 282-290.
- NEW, M., HULME, M et JONES, P. (1999): Representing twentieth century space-time climate variability. Part I: development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology. *J. Clim.* **12**(3), 829-856.
- 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. Clim.* **13**(13), 2217-2238.
- 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*. Université Montpellier II. Thèse de Doctorat, 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 XXth Century, *IAHS Publ.* **252**, 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. *J. Hydrol.* **168**, 11-125.
- PENMAN, H. L. (1948): Natural Evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **193**(1032), 120-145
- SERVAT, E. et DEZETTER A. (1988) : Simple et Rosen : deux méthodes d'optimisations non linéaires. Théorie et Pratique. ORSTOM, Montpellier, notice OVNIh1.