

## Prévision saisonnière du volume de crue du Fleuve Sénégal: utilisation des résultats du modèle ARPEGE Climat

JEAN-CLAUDE BADER<sup>1</sup>, JEAN-PHILIPPE PIEDELIEVRE<sup>2</sup> & JEAN-PIERRE LAMAGAT<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut de Recherche pour le Développement, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France  
bader@mpl.ird.fr

<sup>2</sup> Météo France, CNRM, 42 Avenue G. Coriolis, F-31057 Toulouse Cedex, France  
jean-philippe.piedelievre@meteo.fr

<sup>3</sup> Institut de Recherche pour le Développement, BP 1386, Dakar, Sénégal  
lamagat@dakar.ird.sn

**Résumé** Le soutien de la crue annuelle du Fleuve Sénégal par le Barrage multi-objectifs de Manantali nécessite de fin août à début octobre de fortes lâchures qui peuvent grever la production hydroélectrique de l'ouvrage. Pour faciliter la programmation de cet objectif par estimation du stock disponible dans le réservoir en fin de mousson, on cherche à prévoir en août le volume de crue naturel du fleuve de septembre–octobre à partir d'index d'anomalies pluviométriques calculés fin juillet pour ces deux mois par le modèle ARPEGE Climat. Après analyse en composantes principales de ces index produits sur un maillage de 300 × 300 km couvrant l'Afrique de l'Ouest, on détermine une zone de 1200 × 1200 km décalée à l'est du bassin où les vecteurs propres des index sont reliés au débit naturel de septembre–octobre par une régression linéaire à cinq paramètres ( $R^2 = 0.651$ ). Cette relation statistique calée sur la période 1979–2000 est validée sur la période 2001–2005.

**Mots clés** Afrique de l'Ouest; analyse en composantes principales; Barrage Manantali; Fleuve Sénégal; gestion de barrage; modèle ARPEGE; précipitations; prévision saisonnière des apports; soutien de crue

### Seasonal forecasting of the flood volume of the Senegal River, based on results of the ARPEGE Climate model

**Abstract** From the end of August to the beginning of October, the support of the annual flood of the Senegal River by the multipurpose Manantali Dam requires high release volumes, which can be problematic for its hydro-electric production. To facilitate the programming of this objective by predicting reserves available in the reservoir at the end of the monsoon, attempts are made to predict in August the natural flood volume of the river for September–October, starting from an index of pluviometric anomalies calculated at the end of July for these two months by the model "ARPEGE Climat". After a principal components analysis of these indexes produced on a 300 × 300 km grid covering West Africa, a 1200 × 1200 km zone may be determined shifted to the east of the basin, where the eigenvectors of the indexes are related to the natural discharge of September–October by linear regression with five parameters ( $R^2 = 0.651$ ). This statistical relationship calculated for the period 1979–2000 is validated for the period 2001–2005.

**Key words** West Africa; principal components analysis; Manantali Dam; Senegal River; reservoir operation; ARPEGE model; precipitation; seasonal discharge forecast; flood support

### CONTEXTE ET OBJECTIF

Implanté sur la Rivière Bafing en Afrique de l'Ouest (Fig. 1), le barrage hydro-électrique de Manantali contrôle environ la moitié des écoulements du Fleuve Sénégal, caractérisés entre juillet et octobre par une crue annuelle de mousson très variable essentiellement alimentée par le haut bassin. Cet ouvrage géré par l'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal) qui regroupe le Mali, la Mauritanie et le Sénégal, est à vocation multiple. Un de ses objectifs consiste à garantir chaque année une crue suffisante pour inonder le lit majeur à l'aval de Bakel, au bénéfice des cultures de décrue et de l'équilibre écologique de la vallée. En cas d'apports faibles sur les affluents non contrôlés, ce soutien de crue nécessite des débits



rétroaction de l'atmosphère vers la surface) par des températures de la surface des océans prévues à l'aide d'un schéma statistique autorégressif d'ordre deux, élaboré à partir des SST Reynolds-Smith de la période 1979–2000. A la fin de chaque mois, à partir d'états initiaux issus des analyses produites par le Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (ECMWF) au réseau de 12 TU et décalés de 24 heures, un ensemble de neuf simulations fournit une statistique de prévision dont nous utilisons la moyenne, en moyennes mensuelles, sur la période des quatre mois suivants.

En chaque point de la grille de calcul constituée de mailles carrées d'environ 300 km de côté, les précipitations convectives et stratiformes issues du modèle ARPEGE sont cumulées et transformées en anomalies mensuelles moyennes centrées et réduites sur la période de référence 1979–2000. L'étude exploite les index d'anomalie pluviométrique ainsi calculés chaque année depuis 1979 à la fin du mois de juillet pour les mois de septembre et d'octobre, sur un ensemble de 84 mailles couvrant l'Afrique de l'Ouest entre les latitudes 0 à 16.74° et les longitudes –21.09 à 18.28°, ce qui dépasse très largement les limites du bassin actif du Sénégal à Bakel (Fig. 1). Chacun de ces 168 index (2 mois prévus × 84 mailles) de pluviométrie mensuelle normée présente une moyenne nulle et un écart type  $\{\sum[(P - P_{\text{moy}})^2/(N - 1)]\}^{0.5}$  égal à 1 sur la période 1979–2000. Une valeur d'index positive ou négative représente donc une prévision de pluie mensuelle respectivement supérieure ou inférieure à la moyenne de cette période pour la maille, l'année et le mois considérés.

En l'état actuel de la science, les modèles de prévision météorologique saisonnière ne peuvent prétendre à une grande précision (Deque, 2004). Il en va ainsi du modèle ARPEGE Climat, qui fournit des prévisions à l'horizon de plusieurs mois devant être interprétées de façon relative, à la fois en valeur et en localisation. C'est pour cette raison que l'étude, loin de se limiter aux quelques mailles situées sur le bassin du Fleuve Sénégal, exploite des index d'anomalie pluviométrique couvrant largement l'Afrique de l'Ouest.

### **Débit moyen naturel de septembre–octobre du Sénégal à Bakel**

Les niveaux observés journalièrement à la station de Bakel sont traduits en débit par un étalonnage établi suivant la méthode du gradient limnimétrique (Dubreuil *et al.*, 1970). Avant 1987, ces débits observés correspondent au régime naturel d'écoulement du fleuve. A partir de 1987 (mise en service du Barrage de Manantali), les débits journaliers naturels sont intégralement reconstitués de deux façons différentes:

- (a) Par modèle de propagation à temps de propagation variable (Morel-Seytoux *et al.*, 1993), à partir des débits naturels de Soukoutali sur le Bafing, Oualia sur le Bakoye et Gourbassy sur la Falémé. Dans ce calcul, les débits de Soukoutali (station située à l'emplacement actuel du barrage), sont eux-mêmes intégralement reconstitués à partir des débits observés aux stations de l'amont: Daka-Saïdou jusque 1994, et Bafing Makana ensuite.
- (b) Par bilan de volume écoulé, à partir des débits observés à Bakel et à la sortie du barrage et du débit naturel à Soukoutali. On adopte un temps de propagation constant de trois jours entre Manantali et Bakel, qui correspond au délai observé pour les forts débits:

$$Q_{\text{Bakel,Naturel}}(j) = Q_{\text{Bakel,Observé}}(j) + Q_{\text{Manantali,Naturel}}(j-3) - Q_{\text{Manantali,Observé}}(j-3)$$

où  $Q_{\text{Bakel,Naturel}}(j)$  est le débit naturel du Sénégal à Bakel au jour  $j$ ;  $Q_{\text{Bakel,Observé}}(j)$  est le débit du Sénégal à Bakel, observé le jour  $j$ ;  $Q_{\text{Manantali,Naturel}}(j-3)$  est le débit naturel du Bafing à Manantali au jour  $j-3$ ; et  $Q_{\text{Manantali,Observé}}(j-3)$  est le débit lâché par le barrage de Manantali au jour  $j-3$ .

Les débits naturels reconstitués par la première méthode sont conservés pour des valeurs inférieures à  $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Le reste du temps, on adopte les valeurs obtenues avec la seconde méthode. Le débit moyen naturel de septembre–octobre (observé jusque 1986 et reconstitué ensuite), dont la moyenne et l'écart type s'élèvent respectivement à  $1327.2$  et  $495.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  sur la période 1979–2000, est donné dans le Tableau 1 pour la période 1979–2005. Il présente une faible autocorrélation interannuelle ( $R^2 = 0.22$  sur 1979–2000 et  $0.09$  sur 1979–2005) et une légère tendance à la hausse en fonction du temps ( $R^2 = 0.43$  sur 1979–2000 et  $0.35$  sur 1979–2005).

**Tableau 1** Débit moyen ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) de septembre–octobre du Sénégal à Bakel en régime naturel, observé de 1979 à 1986 et reconstitué de 1987 à 2005 à partir de débits observés en amont et non influencés par le Barrage de Manantali.

Année	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	
Débit	929	1214	1179	962	641	576	1100	1363	1070	1612	1347	811	1383	
Année	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Débit	1048	1029	2034	1869	1457	1499	2027	2682	1367	1545	1191	2468	1228	1708

## METHODE

Une relation est recherchée entre les index bruts d'anomalie pluviométrique définis plus haut et le débit moyen naturel de septembre–octobre du Sénégal à Bakel. Une fois établie sur la période 1979–2000, cette relation est ensuite testée sur la période 2001–2005.

Pour ce faire, les résultats du modèle ARPEGE Climat sont d'abord regroupés suivant 30 zones rectangulaires (Fig. 1): 11 zones de  $4 \times 4$  mailles notées A2 à K2; neuf zones de  $6 \times 5$  mailles notées A3 à I3; 10 zones de  $5 \times 6$  mailles notées A4 à J4.

Sur chacune de ces zones, une analyse en composantes principales (Bouroche & Saporta, 1980) est effectuée pour la période 1979–2000 sur les index d'anomalie pluviométrique concernés qui sont au nombre de 32 pour les zones A2–K2 et 60 pour les zones A3–I3 et A4–J4. Ceci permet d'exprimer la majeure partie de l'information contenue dans le jeu d'index de la zone à partir d'un nombre limité de variables indépendantes (vecteurs propres).

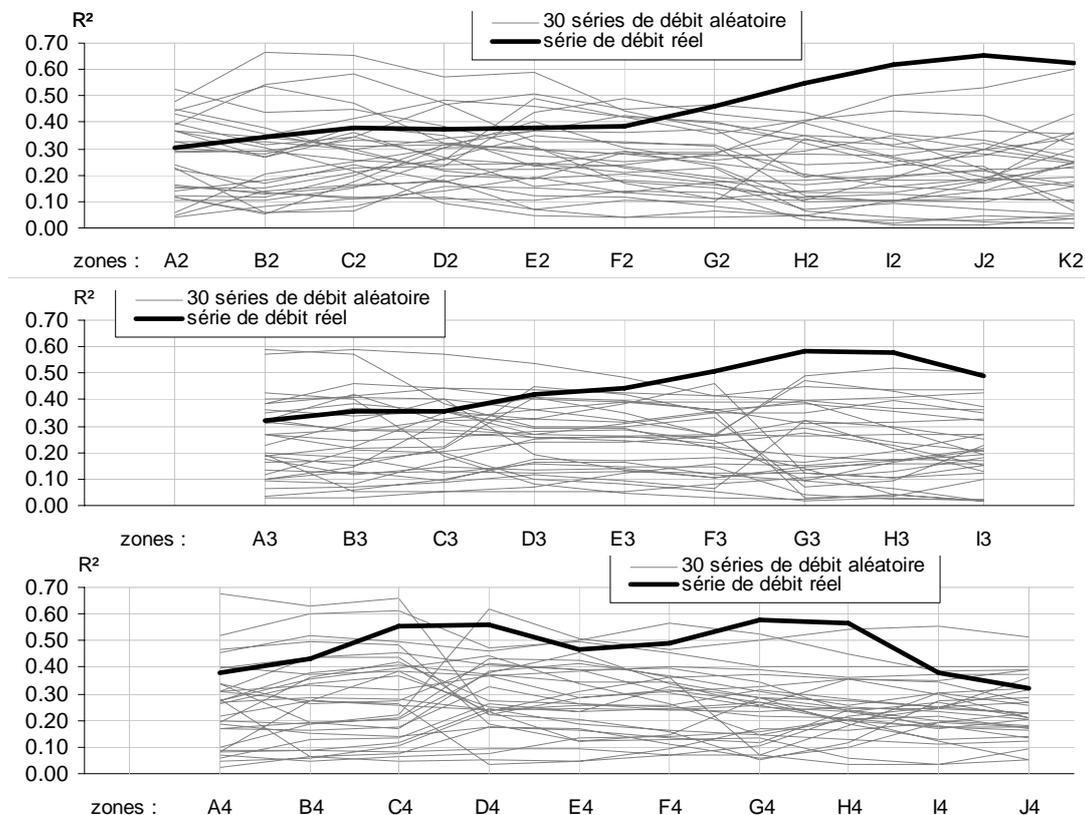
Pour chaque zone, les cinq premiers vecteurs propres  $V_1$  à  $V_5$  sont retenus pour la recherche d'une relation par corrélation linéaire multiple avec le débit moyen naturel  $Q$  de septembre–octobre du Fleuve Sénégal à Bakel sur la période 1979–2000. Ce choix de  $V_1$  à  $V_5$  est basé sur les arguments suivants: (a) on ne peut se limiter à  $V_1$  qui n'est pas forcément le meilleur prévisseur du débit  $Q$ ; (b) le petit échantillon de 22 années ne permet pas d'utiliser de nombreux prévisseurs; et (c) pour chaque zone, la part expliquée de variance totale des index est supérieure à 75% pour  $V_1 \dots V_5$  et inférieure à 6% pour chacun des vecteurs propres suivants.

## RESULTATS

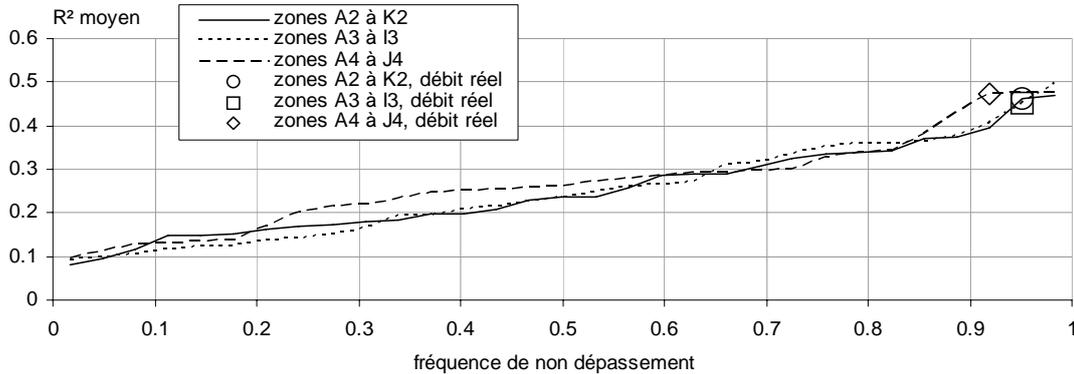
### Détermination du meilleur jeu d'index

Le Tableau 2, qui résume les résultats des 30 analyses effectuées, montre que les zones présentant les meilleurs résultats sont assez proches pour les trois formes analysées (I2, J2, K2; G3, H3; et G4, H4). C'est la zone J2, située entre 4.22 et 15.47°E et entre 5.58 et 16.74°N qui présente la meilleure relation ( $R^2 = 0.651$ ) entre le débit naturel de septembre–octobre du Fleuve Sénégal et les cinq premiers vecteurs propres. Ces derniers expriment 88% de la variance des index d'anomalie pluviométrique prévus sur cette zone. Ce sont donc les résultats obtenus avec les index calculés sur la zone J2 qui sont considérés dans la suite de l'étude.

Cependant, l'éloignement de cette zone optimale J2 centrée 2000 km à l'est du Fleuve Sénégal, déterminée par une procédure de test effectuée sur de multiples zones, peut faire planer un doute sur les résultats obtenus. Le débit du Sénégal est-il réellement relié aux index, ou bien le  $R^2$  de 0.651 ne résulte-t-il que d'un heureux hasard récompensant la recherche acharnée d'un résultat? Pour lever le doute, la procédure suivie a été reproduite pour trente séries différentes de débit de mêmes moyenne et écart type, obtenues chacune en recombinaison de façon aléatoire (tirage sans remise) la série des débits naturels observés sur la période 1979–2000. Ces séries



**Fig. 2** Coefficient de corrélation multiple entre les vecteurs propres  $V_1$  à  $V_5$  des index (pour les 30 zones A2–K2, A3–I3 et A4–J4) et différentes séries de débit de septembre–octobre sur la période 1979–2000 (une série de débit naturel réel et 30 séries de débit aléatoire).



**Fig. 3** Fonction de répartition de la moyenne sur les zones A2–K2, A3–I3, ou A4–J4, du coefficient de corrélation multiple (1979–2000) entre les vecteurs propres  $V_1$  à  $V_5$  des index et le débit  $Q$ , pour les 31 séries de débit analysées (1 série réelle et 30 séries fictives).

présentent forcément des caractéristiques d'autocorrélation ( $R^2$  entre 0.00 et 0.21) et de tendance ( $R^2$  entre 0.00 et 0.12) différentes de la série réelle des débits naturels, ce qui n'empêche pas, toutefois, la comparaison des résultats.

La Fig. 2 montre que sur la majorité des trente zones analysées, les séries simulées (débits naturels aléatoirement recombinaés) sont soit toutes, soit presque toutes, moins bien corrélées aux vecteurs propres  $V_1$  à  $V_5$  que la série des débits naturels observés. Ces derniers présentent une valeur moyenne de  $R^2$  égale à 0.461 (resp. 0.451 et 0.473) sur l'ensemble des zones A2 à K2 (resp. A3–I3 et A4–J4), valeur dépassée seulement par une (resp. une et deux) des trente séries aléatoires testées (Fig. 3). Enfin, sur les 900 valeurs de  $R^2$  obtenues avec les débits aléatoires (30 séries  $\times$  30 zones), seules cinq dépassent, et de très peu (maximum: 0.678), la valeur 0.651 obtenue avec les débits réels sur la zone J2. Ces différents constats permettent de penser que la relation établie entre les index d'anomalie pluviométrique de septembre–octobre prévus fin juillet et le débit naturel du Fleuve Sénégal sur ces deux mois n'est probablement pas le fruit d'un pur hasard, même si cette éventualité ne peut être écartée à cent pourcent.

### Relation établie entre les index prévus sur la zone J2 et le débit

La méthode de régression descendante (Scherrer, 1984), consistant à éliminer à chaque étape le prévisseur le moins significatif, permet de relier le débit naturel moyen bimensuel  $Q$  de septembre–octobre du Sénégal à Bakel exprimé en  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  aux vecteurs propres  $V_1$  à  $V_5$  des index de la zone J2 de la façon suivante:

$$Q = f(V_1, \dots, V_5) = 1327.2 - 12.41V_1 + 36.77V_2 - 89.81V_3 - 204.48V_4 - 82.80V_5$$

$$(R^2 = 0.6507)$$

$$Q = f(V_2, \dots, V_5) = 1327.2 + 36.77V_2 - 89.81V_3 - 204.48V_4 - 82.80V_5$$

$$(R^2 = 0.6422)$$

$$Q = f(V_2, \dots, V_4) = 1327.2 + 36.77V_2 - 89.81V_3 - 204.48V_4$$

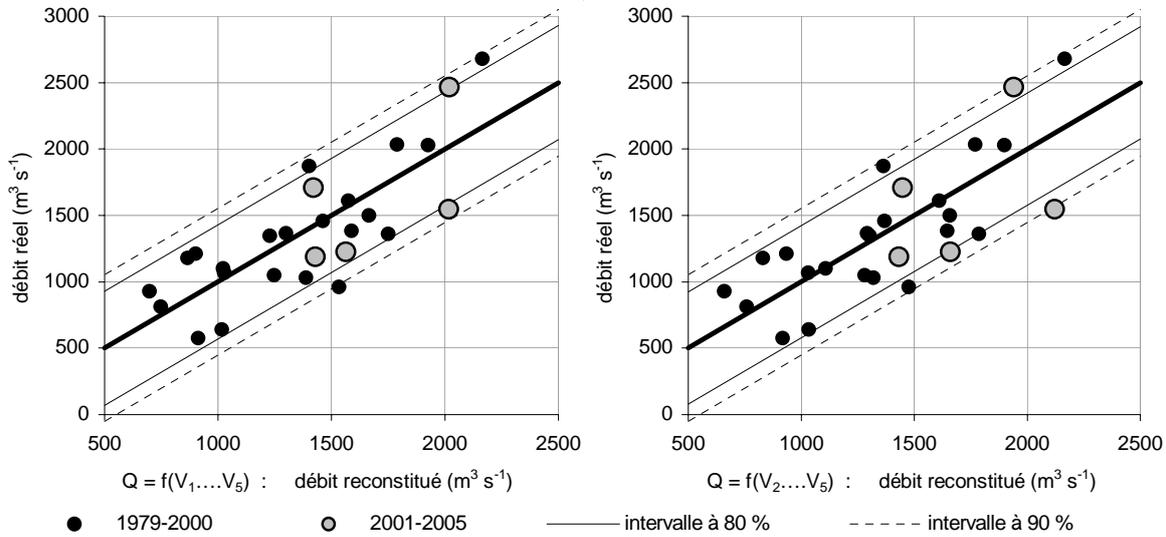
$$(R^2 = 0.6002)$$

**Tableau 2** Pourcentage de variance des index expliqué par leurs cinq premiers vecteurs propres  $V_1$  à  $V_5$  sur les différentes zones pour la période 1979–2000. Coefficient de détermination  $R^2$  de la corrélation linéaire multiple entre ces cinq vecteurs propres et le débit moyen naturel de septembre–octobre du Sénégal à Bakel.

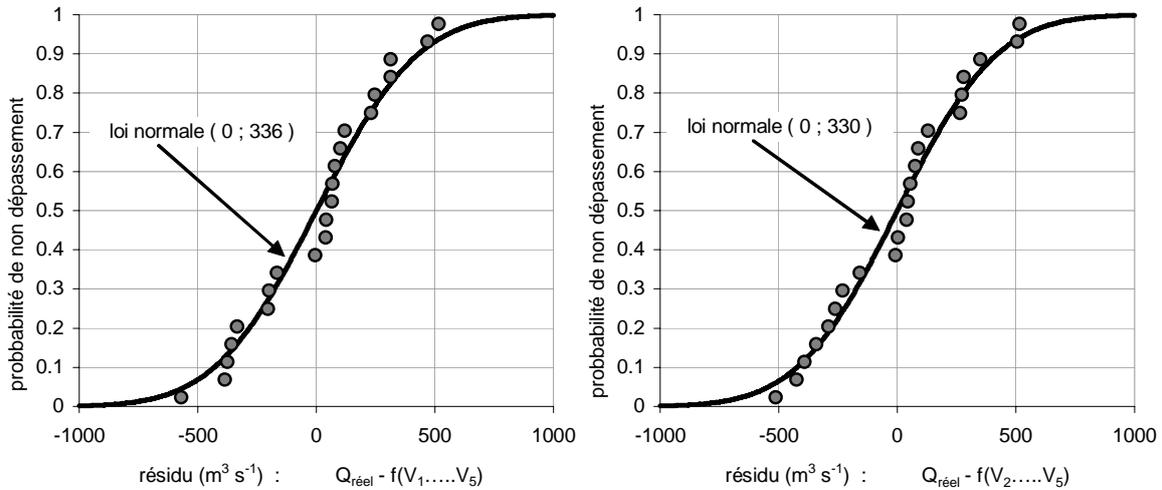
Zone	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	H2	I2	J2	K2
Variance expliquée (%)	85	84	85	86	86	87	87	86	87	88	87
$R^2$ de $Q = f(V_1...V_5)$	0.306	0.341	0.381	0.375	0.379	0.383	0.462	0.550	0.620	0.651	0.625
Zone	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	H3	I3		
Variance expliquée (%)	78	79	78	79	81	79	79	80	78		
$R^2$ de $Q = f(V_1...V_5)$	0.322	0.355	0.357	0.420	0.446	0.507	0.586	0.576	0.491		
Zone	A4	B4	C4	D4	E4	F4	G4	H4	I4	J4	
Variance expliquée (%)	77	78	79	77	78	78	76	76	76	75	
$R^2$ de $Q = f(V_1...V_5)$	0.378	0.434	0.552	0.558	0.468	0.491	0.577	0.567	0.381	0.319	

**Tableau 3** Coefficients des index bruts d'anomalie pluviométrique calculés fin juillet dans le débit  $Q$  reconstitué, en fonction des coordonnées géographiques des mailles et du mois prévu, pour les modèles de prévision  $Q = f(V_1...V_5)$  et  $Q = f(V_2...V_5)$ .

Maille	3	4	5	6	17	18	19	20	31	32	33	34	45	46	47	48	Vecteurs
Latitude	15.35	15.35	15.35	15.35	12.56	12.56	12.56	12.56	9.77	9.77	9.77	9.77	6.98	6.98	6.98	6.98	propres
Longitude	5.63	8.44	11.25	14.06	5.63	8.44	11.25	14.06	5.63	8.44	11.25	14.06	5.63	8.44	11.25	14.06	utilises
Septembre	-27.0	15.1	50.2	48.4	-51.7	-30.2	-2.1	-21.1	-67.5	-79.4	-65.3	-58.4	-0.5	-10.9	-39.8	-46.6	$V_1$ à $V_5$
Octobre	2.0	-14.4	-25.4	1.3	7.9	-20.5	-29.2	0.1	17.2	17.5	26.1	12.4	92.4	110.8	65.0	9.3	
Constante	1327.2																
Septembre	-24.9	17.4	52.1	50.5	-49.3	-27.8	0.3	-18.3	-66.0	-77.1	-62.5	-55.4	-1.3	-11.4	-38.8	-45.0	$V_2$ à $V_5$
Octobre	4.1	-12.5	-23.9	3.6	9.9	-18.2	-26.9	2.8	19.9	20.4	29.0	15.0	94.4	113.0	67.6	11.8	
Constante	1327.2																

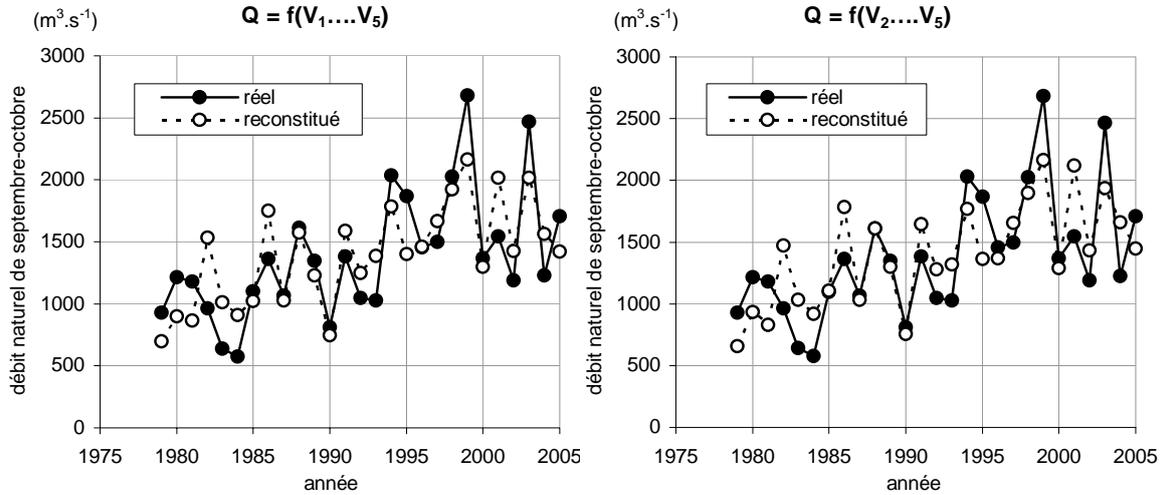


**Fig. 4** Relation entre les valeurs réelles du débit naturel de septembre–octobre du Sénégal à Bakel et les valeurs reconstituées  $f(V_1...V_5)$  et  $f(V_2...V_5)$  à partir des cinq premiers vecteurs propres des 32 index d’anomalie pluviométrique de septembre et d’octobre calculés fin juillet pour la zone J2.



**Fig. 5** Fonctions de répartition des résidus des relations  $Q = f(V_1...V_5)$  et  $Q = f(V_2...V_5)$  sur la période 1979–2000.

Bien que très lié ( $R = 0.985$ ) à la moyenne des index sur la zone J2, le vecteur propre  $V_1$  est peu significatif. C’est donc probablement la répartition (spatiale sur J2 et temporelle entre septembre et octobre) des valeurs d’index, plus que leur moyenne d’ensemble, qui est déterminante pour le débit  $Q$ . L’écart type résiduel ajusté  $\{\sum[(Q_{réel} - Q_{reconstitué})^2 / (N - p - 1)]\}^{0.5}$  des relations, où  $N$  est la taille de l’échantillon (22) et  $p$  le nombre de paramètres (5, 4 et 3) s’élève respectivement à 336, 330 et 338  $m^3 s^{-1}$ . La dégradation de l’ajustement observée avec la troisième relation nous conduit à ne conserver que les deux premières. En utilisant les coordonnées des vecteurs propres, ces deux relations permettent d’exprimer directement le débit  $Q$  en fonction des index bruts avec les coefficients indiqués dans le Tableau 3.



**Fig. 6** Comparaison du débit naturel réel de septembre–octobre du Sénégal à Bakel avec les valeurs reconstituées par les modèles à cinq et quatre paramètres à partir des index calculés fin juillet sur la zone J2.

Le tracé des valeurs réelles en fonction des valeurs reconstituées pour le débit  $Q$  (Fig. 4) montre que les relations  $Q = f(V_1 \dots V_5)$  et  $Q = f(V_2 \dots V_5)$  sont relativement linéaires et homoscédastiques. Leurs résidus se répartissent assez bien selon une loi de Gauss centrée ayant pour norme leur écart type résiduel (Fig. 5). Ceci nous permet de porter sur la Fig. 4 les intervalles de confiance à 80 et 90% de la relation  $Q_{\text{réel}} = f(Q_{\text{reconstitué}})$ , écartés respectivement de 1.282 et 1.645 écarts types résiduels de part et d'autre de la première bissectrice.

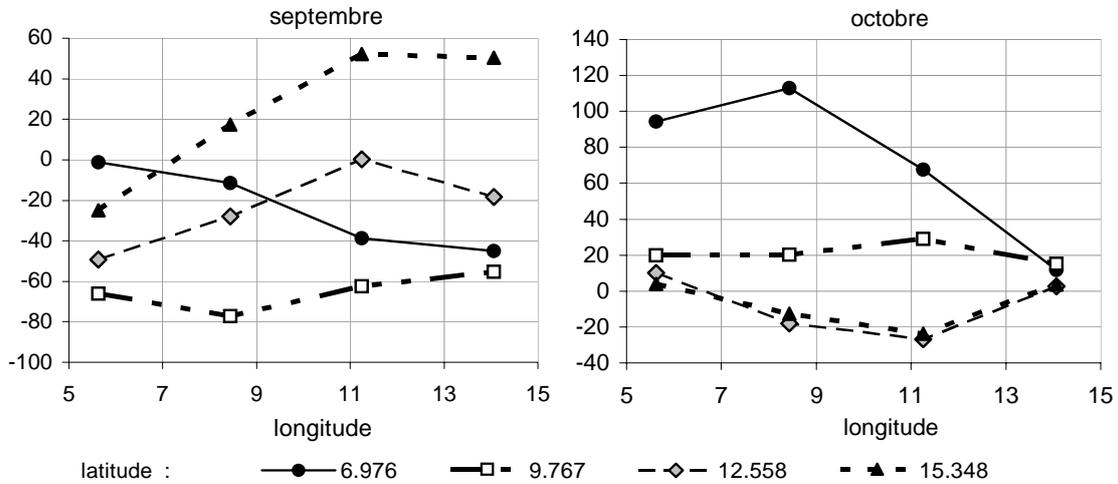
La Fig. 6 permet de comparer l'évolution du débit naturel réel de septembre–octobre avec celles du débit reconstitué à partir de  $f(V_1 \dots V_5)$  et de  $f(V_2 \dots V_5)$ . Sur la période 1979–2000, on constate que le sens de variation d'une année sur l'autre du débit réel est respecté 18 fois sur 21 par le débit reconstitué issu des deux modèles. Ceci constitue un assez bon score, compte tenu du fait que ce sens de variation change 11 fois sur la période.

### Champ spatial des coefficients d'index

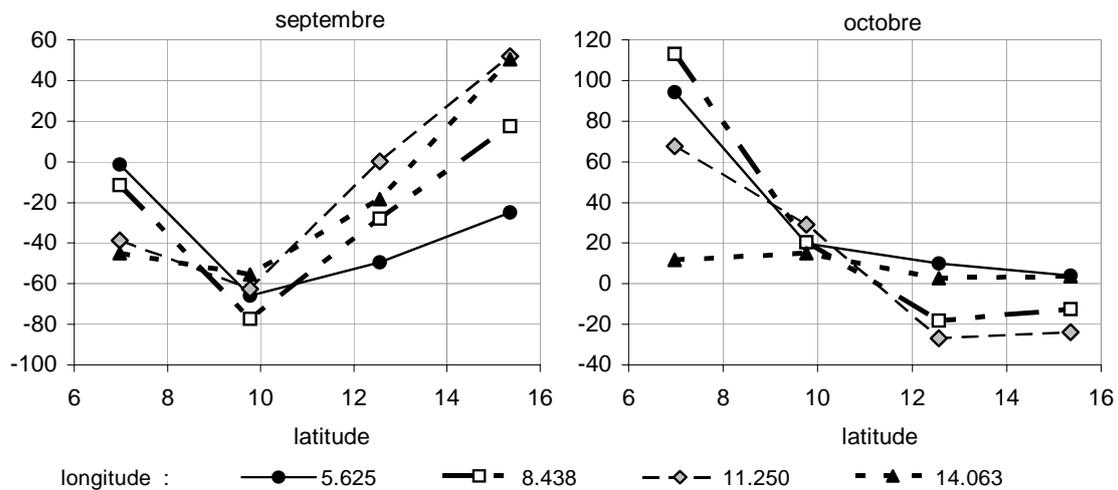
Déduits des relations  $Q = f(V_1 \dots V_5)$  et  $Q = f(V_2 \dots V_5)$  et des coordonnées des vecteurs propres, les coefficients indiqués dans le Tableau 3 permettent de reconstituer directement le débit naturel de septembre–octobre du Sénégal à Bakel en fonction des 32 index bruts de septembre et d'octobre calculés fin juillet sur la zone J2. En notant  $I_n(\text{sept})$  et  $I_n(\text{oct})$  les index bruts prévus fin juillet par ARPEGE pour septembre et octobre sur une maille de rang  $n$ , les coefficients du modèle à cinq paramètres s'interprètent de la façon suivante:

$$Q = -27.0I_3(\text{sept}) + \dots -46.6I_{48}(\text{sept}) + 2.0I_3(\text{oct}) + \dots + 9.3I_{48}(\text{oct}) + 1327.2$$

Avec très peu de différence entre les modèles à cinq et quatre paramètres, ces coefficients présentent une structure peu marquée suivant la direction est–ouest mais assez nette suivant la direction nord–sud, comme le montrent les Figs 7 et 8 pour le modèle à cinq paramètres. Cette organisation spatiale pourrait être en relation avec la



**Fig. 7** Variations est-ouest des coefficients permettant de reconstituer le débit naturel de septembre-octobre du Sénégal à Bakel en fonction des index d'anomalie pluviométrique de septembre et d'octobre calculés fin juillet sur la zone J2 (modèle à cinq paramètres).



**Fig. 8** Variations nord-sud des coefficients permettant de reconstituer le débit naturel de septembre-octobre du Sénégal à Bakel en fonction des index d'anomalie pluviométrique de septembre et d'octobre calculés fin juillet sur la zone J2 (modèle à cinq paramètres).

direction générale est-ouest des isohyètes dans la région (L'Hôte & Mahé, 1996), liée au déplacement nord-sud du front intertropical de convergence qui est à l'origine de la mousson annuelle.

Résultant d'un calage statistique, les coefficients du Tableau 3 s'appliquent sur des index bruts de prévisions pluviométriques centrées réduites. Des corrélations négatives existent entre les index de certaines mailles ( $R = -0.428$  entre  $I_3(\text{sept})$  et  $I_{45}(\text{sept})$ ;  $R = -0.457$  entre  $S_4(\text{sept})$  et  $S_{46}(\text{sept})$ ;  $R = -0.298$  entre  $S_5(\text{sept})$  et  $S_{47}(\text{sept})$ ; etc.), ce qui signifie que l'excédent de pluie prévu sur telle maille va de pair avec un déficit prévu sur telle autre, et *vice versa*. Ceci pourrait expliquer la présence de valeurs négatives dans le Tableau 3.

## Validation

Pour les années 2001 à 2005, situées hors période de calage, les débits de septembre–octobre reconstitués par  $Q = f(V_1 \dots V_5)$  et  $Q = f(V_2 \dots V_5)$  se situent tous à l'intérieur des intervalles de confiance à 90% de ces deux modèles (Fig. 4), avec une assez bonne reproduction du sens de variation interannuel (Fig. 6). Les erreurs quadratiques moyennes  $\{\sum[(Q_{\text{réel}} - Q_{\text{reconstitué}})^2/N]\}^{0.5}$  obtenues sur ces cinq années ( $367 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pour  $Q = f(V_1 \dots V_5)$  et  $429 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pour  $Q = f(V_2 \dots V_5)$ ) montrent cependant une meilleure validation pour le modèle à cinq paramètres, que nous retiendrons comme résultat final. Sur l'ensemble de la période 1979–2005, ce modèle (Tableau 4) présente une erreur absolue moyenne équivalant à 19% du débit naturel moyen interannuel de septembre–octobre.

**Tableau 4** Débit moyen ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) de septembre–octobre du Sénégal à Bakel en régime naturel, reconstitué par le modèle à cinq paramètres  $Q = f(V_1 \dots V_5)$  à partir des 32 index d'anomalie pluviométrique de septembre et d'octobre calculés fin juillet pour la zone J2.

Année	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	
Débit	698	901	866	1533	1015	911	1022	1749	1028	1573	1228	747	1589	
Année	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Débit	1247	1387	1787	1400	1462	1665	1925	2166	1299	2015	1428	2018	1564	1421

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus, à confirmer sur les années à venir, montrent que les prévisions saisonnières de pluviométrie faites par Météo-France avec le modèle ARPEGE Climat pourraient être utilisées pour prévoir approximativement, dès fin juillet, le volume naturel de crue de septembre–octobre du Fleuve Sénégal à Bakel. Le modèle statistique à cinq paramètres proposé ici, calé sur un échantillon de 22 années, semble pour le moment validé par les observations hors calage de ces cinq dernières années.

Au Barrage de Manantali, le soutien de crue annuel est actuellement programmé en fonction du stock d'eau initial disponible dans le réservoir. Son coût en eau étant fortement lié au volume naturel de crue du Fleuve Sénégal, la prévision de ce dernier permet d'envisager une programmation plus judicieuse, tenant compte des possibilités objectives de reconstitution du stock pendant la mousson. Le bénéfice potentiel apporté par cette prévision au niveau des performances de l'ouvrage sera évalué par simulation numérique lors d'une prochaine étude menée à l'IRD par l'UMR 183 G-Eau.

L'intérêt d'une prévision saisonnière des pluies pour la gestion des barrages réservoirs est particulièrement évident pour ceux qui, comme Manantali, contrôlent des cours d'eau alimentés par une mousson annuelle relativement brève. Une prévision sur quelques mois faite en début de mousson aide à programmer la gestion sur l'année à venir, puisque les performances potentielles de ces ouvrages en saison sèche découlent inéluctablement du stock accumulé dans leurs réservoirs en fin de mousson. Le haut bassin du Fleuve Niger, contigu à celui du Fleuve Sénégal et soumis à des conditions climatiques très voisines, alimente les retenues de grands barrages déjà implantés ou en projet. Une étude similaire à celle menée ici pour le Fleuve Sénégal sera donc menée prochainement pour le Fleuve Niger.

Enfin, Météo France prévoit d'améliorer son modèle ARPEGE Climat en remplaçant notamment le forçage de ses conditions aux limites par un couplage avec un modèle de circulation générale océanique. Dans le cadre de la collaboration qui va se poursuivre avec Météo France, l'IRD utilisera les résultats de cette nouvelle version du modèle pour tenter d'améliorer la prévision saisonnière des débits de crue du Fleuve Sénégal.

## REFERENCES

- Bader, J. C., Lamagat, J. P. & Guiguen, N. (2003) Gestion du Barrage de Manantali sur le Fleuve Sénégal: analyse quantitative d'un conflit d'objectifs. *Hydrol. Sci. J.* **48**(4), 525–538.
- Bouroche, J. M. & Saporta, G. (1980) *Que sais-je? L'analyse des données*. Presses Universitaires de France, Paris, France
- Brankovic, C. & Palmer, T. N. (2000) Seasonal skill and predictability of ECMWF PROVOST ensembles. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **126**, 2035–2067.
- Deque, M. (2004) Peut-on faire des prévisions saisonnières? Le point de vue d'un modélisateur. *La Lettre du Changement Global. Lettre pigb-pmrc-France* **17**, 63–67.
- Deque, M., Drevet, C., Braun, A. & Cariolle D. (1994) The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dyn.* **10**, 249–266.
- Dubreuil, P., Lamagat, J. P. & Vuillaume, G. (1970) Tarage et calcul des débits des stations hydrométriques non univoques. *Cahiers ORSTOM, sér. Hydrologie* **VII**(3), 3–72.
- IRD (1999) Programme d'Optimisation de Gestion des Réservoirs. Phase 2. Rapport de synthèse. IRD, OMVS. Dakar, Sénégal.
- L'Hôte, Y. & Mahé, G. (1996) Afrique de l'Ouest et Centrale, précipitations moyennes annuelles (période 1951–1989). Carte à l'échelle 1/6 000 000. Orstom, Paris.
- Morel-Seytoux, H., Fahmy, H. & Lamagat, J. P. (1993) A composite hydraulic and statistical flow-routing method. *Water Resour. Res.* **29**(2), 413–418.
- Scherrer, B. (1984) *Biostatistique*. Gaëtan Morin, Montreal, Canada

**Reçu le 7 mars 2005; accepté le 1 mars 2006**