

# Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest

Mohamed Hamatan<sup>1</sup>  
Gil Mahe<sup>2</sup>  
Éric Servat<sup>2</sup>  
Jean-Emmanuel Paturel<sup>2</sup>  
Abou Amani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre régional de formation et  
d'application en agrométéorologie  
hydrologie et météorologie (AGRHYMET),  
BP 11011,  
Niamey,  
Niger

<m.hamatan@agrhyet.ne>  
<a.amani@agrhyet.ne>

<sup>2</sup> Unité mixte de recherche HydroSciences,  
Institut de recherche pour le développement  
(IRD),

Maison des sciences de l'eau,  
BP 64501,  
34394 Montpellier cedex 5,  
France

<Gil.Mahe@msem.univ-montp2.fr>  
<eric.servat@msem.univ-montp2.fr>  
<jean-emmanuel.paturel@msem.univ-  
montp2.fr>

## Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer les prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest (PRESAO) depuis le début du processus en 1998 et de prendre en compte autant que possible, d'autres paramètres océaniques et continentaux susceptibles d'être corrélés significativement avec les précipitations et écoulements des grands fleuves de la région ouest-africaine. Une étude pilote a été menée dans quatre pays : le Bénin, la Guinée, le Mali et le Tchad. Les modèles utilisés dans le cadre des PRESAO étant calibrés généralement sur la période 1961-1990, l'évaluation a porté sur la période 1991-1997. Cette évaluation montre que les températures de surface de la mer jusqu'ici utilisées lors des PRESAO expliquent mal les précipitations en Afrique de l'Ouest. Mais des améliorations restent possibles. Ainsi, l'utilisation des anomalies de températures de surface de la mer de la fenêtre 8°W-12°W/2°N-2°S améliore les performances des modèles, donc les scores de prévision. On constate de fortes connexions entre la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et les zones océaniques de la façade atlantique de l'Afrique situées sur le parcours de la mousson africaine, moteur des phénomènes pluvieux dans la région. Ces résultats plaident en faveur de l'exploration d'autres prédicteurs en vue d'améliorer les prévisions.

*Mots clés : Météorologie, Hydrologie, Modélisation, Afrique de l'Ouest*

## Summary

### **Synthesis and evaluation of the seasonal forecasts in West Africa**

Our objective is to evaluate seasonal weather forecasts in West Africa since the beginning of the PRESAO process in 1998 and then to highlight any other oceanic or continental parameters which may possibly correlate with the flows of the large rivers and with the rainfall in West Africa. Four countries are considered in this study: Benin, Guinea, Mali, and Chad. The models used within the framework of PRESAO being generally gauged over the period 1961-1990, the evaluation is related to the period 1991-1997. This evaluation shows the insufficiency of the sea surface temperatures used up to now at the time of the PRESAO, to explain precipitations in West Africa. But improvements remain possible. For example, the use of the area 8°W-12°W/2°N-2°S through the anomalies of sea surface temperatures improves the performances of the models, therefore the scores of the forecast. This indicates strong connections between precipitations in West Africa and the oceanic zones of the Atlantic frontage of Africa located on the course of the African monsoon which brings rainfall in the aforementioned area. This encourages the exploration of other predictors in order to improve the forecasts.

*Keywords: Meteorology, West Africa, Hydrology, Modelling*

Les pays sahéliens d'Afrique de l'Ouest souffrent depuis plus de 30 ans de la sécheresse [1-4] dont les conséquences se traduisent, entre autres, par l'amenuisement des cumuls pluviométriques et de l'écoulement des grands cours d'eau.

Dans cette sous-région ouest africaine, comme dans beaucoup d'autres de la zone intertropicale, le régime pluviométrique est lié à l'intensité de la convection [5, 6] et surtout au mouvement saisonnier de la zone de convergence intertropicale [7]. Dans les pays sahéliens, on observe une seule saison des pluies, appelée hivernage, où est concentré l'essentiel des activités économiques. La population vit essentiellement de l'agriculture et de l'élevage, et les précipitations expliquent à plus de 60 % la production agricole des pays sahéliens de l'Afrique de l'Ouest [8]. Cela justifie donc l'intérêt accordé à cette saison.

L'analyse des données pluviométriques fait ressortir de fortes variations interannuelles et pluriannuelles marquées par une baisse des précipitations depuis les années 1970, aussi bien dans la zone sahélienne que dans les zones plus humides de l'Afrique de l'Ouest [1, 4].

Des modèles ont été mis en œuvre pour modéliser cette variabilité et prévoir ainsi les périodes sèches et humides pour une meilleure gestion des ressources en eau [9].

À l'instar des modèles de prévisions utilisés, un processus appelé PRESAO (PREvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest) a été mis en place en 1998 par le consortium ACMAD<sup>1</sup>-AGRHYMET<sup>2</sup>-ABN<sup>3</sup>-ICRISAT<sup>4</sup>.

Ce processus fournit des prévisions de conditions moyennes du climat, à savoir : précipitations pour la période de juillet à septembre (période JAS, correspondant à la saison des pluies de la zone sahélienne) et écoulements des cours d'eau pendant la période des hautes eaux [8]. Le processus PRESAO œuvre dans sa zone d'intervention pour la réduction de la vulnérabilité à la variabilité du climat. Les informations fournies permettront de prendre des mesures qui s'imposent pour une meilleure gestion de la ressource en eau.

## Objectifs

L'étude que nous avons menée sur quatre des pays de la zone d'intervention du

<sup>1</sup> African Centre of Meteorological Application for Development.

<sup>2</sup> AGRométéorologie-Hydrologie-METéorologie.

<sup>3</sup> Autorité du Bassin du Niger.

<sup>4</sup> International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.

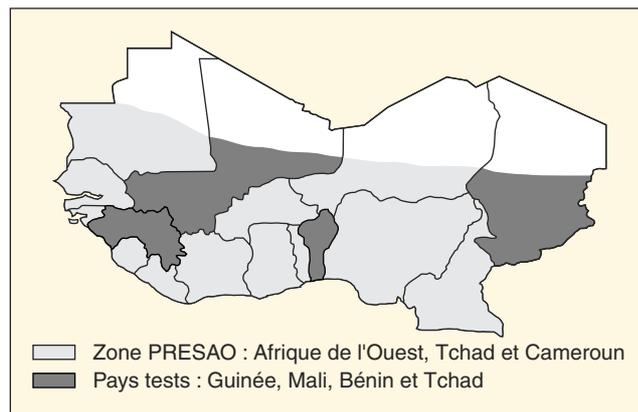


Figure 1. Zone d'intervention PRESAO (PREvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest) et pays tests pour la présente étude.

PRESAO (figure 1), a pour principaux objectifs :

- tout d'abord d'évaluer les performances des modèles de prévisions saisonnières élaborés par le PRESAO ;
- ensuite d'améliorer les prévisions par la prise en compte de nouveaux indicateurs climatiques à corrélés avec les indices pluviométriques (cumul JAS) et hydrologiques (débits de crues, débit moyen de la période de crue).

## Zone d'étude

La Guinée : pour sa réputation de *château d'eau de l'Afrique occidentale* et pour la faible régularisation des cours d'eau y prenant leur source ;

Le Mali : pour le nombre important de stations étudiées lors du processus PRESAO ;

Le Tchad : par connexion à la thèse d'une étudiante de l'équipe VAHYNE<sup>5</sup> de l'unité mixte de recherche HydroSciences de Montpellier, qui travaille sur cette région et qui a pu obtenir des données récentes ;

Le Bénin : dans le souci d'étudier et de pouvoir comparer nos modèles à ceux élaborés par l'*African Center of Meteorological Application for Development* (ACMAD) sur un pays non sahélien.

## Données et méthode

Les données de base sont des hauteurs de pluies mensuelles (pour la prévision des pluies) et les débits moyens mensuels (pour la prévision hydrologique). Ces données sont préalablement comblées (au cas où elles présenteraient quelques lacunes) à

<sup>5</sup> Variabilité Hydrologique et impacts anthropiques sur les hydrosystèmes.

l'aide de méthodes statistiques classiques et d'interpolation du logiciel Hydrolab [10].

### Données pluviométriques (mensuelles)

Nous avons utilisé 42 postes : 9 au Bénin, 19 au Mali et 14 au Tchad. Les données relatives à ces stations sont issues de la base de données SIEREM de l'unité mixte de recherche Hydrosciences de Montpellier et complétées pour la période récente à partir de la base de données du laboratoire d'hydrologie de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) à Ouagadougou.

### Données hydrométriques

Nous avons identifié 15 postes hydrométriques [11] mais seuls 7 ont été utilisés en raison de la qualité des données : 1 au Bénin, 1 en Guinée, 1 au Mali et 4 au Tchad.

Pour les pays sahéliens (figure 2), les précipitations au cours de l'année sont concentrées en une seule saison dont le cumul entre juillet et septembre avoisine 80 % du total annuel.

Quant à l'hydrologie des fleuves de l'Afrique de l'Ouest, nous avons étudié la période des hautes eaux, étalée sur les mois de juillet à décembre (figure 3) ; cela justifie le choix de limiter les prévisions aux cumuls pluviométriques de juillet-août-septembre (JAS) et des écoulements relatifs à la période des hautes eaux.

### Données de températures de surface de la mer (SST)

Les données SST sont relatives aux quatre zones océaniques utilisées par l'ACMAD (figure 4) :

- l'Atlantique équatorial sud : 0°-10° S/10° E-20° W ;

- l'Atlantique nord-ouest : 20° N-40° N/10° W-30° W ;

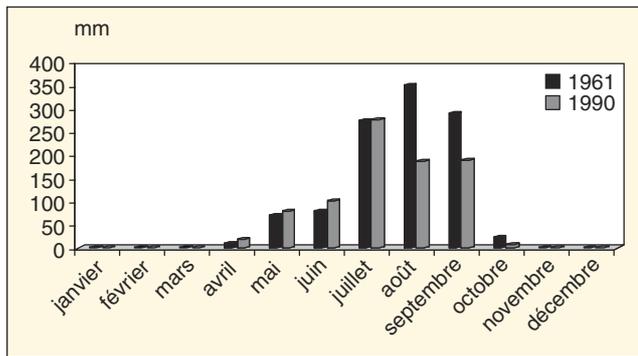


Figure 2. Pluies mensuelles à Bamako Senou (12° 32 Nord-7° 57 Ouest) pendant les années 1961 et 1990, en mm.

– le Niño 3 : 10° N-10° S/90° W-150° W ;  
 – la variation à long terme de l’océan global : EOF3 ; et pour tenter d’améliorer les prévisions, nous avons exploré une cinquième zone, l’Upwelling Atlantique équatorial : 2° N-2° S/8° W-12° W (figure 4).

### Démarche PRESAO

Les modèles issus des PRESAO consistent à donner une appréciation qualitative de la saison des pluies ou de l’écoulement des grands fleuves de l’Afrique de l’Ouest. L’idée est de prévoir l’indice de pluie sur la période JAS ou l’indice de débit d’un mois donné (pendant la période des hautes

eaux). Ensuite, à travers une classification d’indices observés, on dira avec une certaine probabilité que la saison des pluies sera déficitaire, normale ou excédentaire ; ou encore que l’hydraulicité d’un fleuve sera faible, moyenne ou forte. Les différentes activités du processus PRESAO, sont structurées selon le pré-forum, le forum et le post-PRESAO (figure 5).

### • Calcul d’indices JAS

$$I_{JAS(i)} = \frac{P_{JAS(i)} - P_{norm}}{\sigma}$$

où :  $I_{JAS(i)}$  : indice de pluie pour le cumul JAS de l’année  $i$  ;

$P_{JAS(i)}$  : cumul pluviométrique entre juillet et septembre de l’année  $i$  ;  
 $P_{norm}$  : normale climatique sur la période 1961-1990 ;  
 $\sigma$  : écart type des cumuls JAS sur la période 1961-1990.

### • Calcul d’indices de débits

$$I_i = \frac{Q_i - Q_{moy}}{\sigma}$$

où :  $I_i$  : indice de débit du mois  $i$  ;  
 $Q_i$  : débit du mois  $i$  ;  
 $Q_{moy}$  : débit moyen sur la série considérée du mois  $i$  ;  
 $\sigma$  : écart type de la série de débits du mois  $i$ .

### • Forme des modèles de prévisions élaborés

Les modèles sont des modèles linéaires de forme générale :

$$I_{JAS} \text{ (OU } I_{Qmensuel}) = f(I_{NIÑO:mas}, I_{EA:mas}, I_{NWA:mas}, I_{EOF3:mas}, I_{UPWEQ:mas})$$

Où :

$I_{NIÑO:mas}$  : indice Niño de mars à septembre ;

$I_{EA:mas}$  : indice SST de mars à septembre de l’Atlantique équatorial sud ;

$I_{NWA:mas}$  : indice SST de mars à septembre de l’Atlantique nord-ouest ;

$I_{EOF3:mas}$  : indice SST de mars à septembre de la 3<sup>e</sup> composante de l’océan global ;

$I_{UPWEQ:mas}$  : indice SST de mars à septembre de l’Upwelling Atlantique équatorial (pris en compte seulement dans les modèles que nous avons proposés).

Les anomalies de SST des mois de mars à septembre sont utilisées, soit en totalité, soit quelques-unes d’entre elles, individuellement ou moyennées par groupes de deux ou trois.

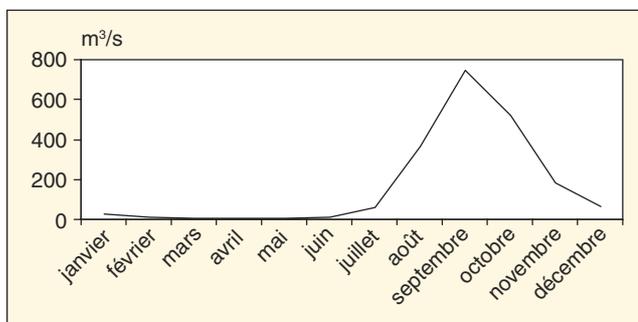


Figure 3. Débits moyens mensuels de la Bagoé à Pankourou au Mali (1956-1996).

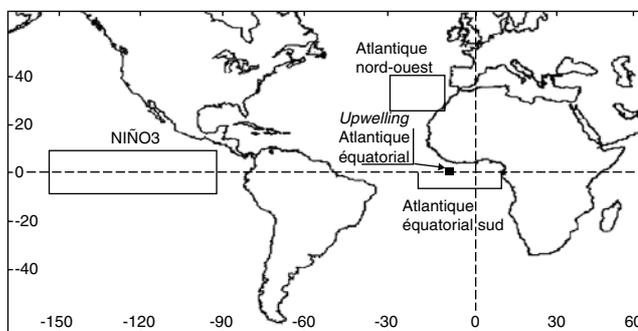


Figure 4. Zones océaniques utilisées.

## Résultats

Nous avons tenté de mettre en évidence d’éventuelles relations entre les paramètres climatiques (principalement les SST) et les phénomènes pluvieux en Afrique de l’Ouest, notamment dans les pays tests, à travers la mise en relation des indices SST et des indices pluviométriques et hydrologiques [12, 13].

Les modèles ainsi élaborés nous permettent de vérifier les pronostics issus des modèles PRESAO et de voir les rôles combinés du nouveau prédicteur (Upwelling Atlantique équatorial) et de la technique adoptée (zonage, analyse statistique, critères d’appréciation des corrélations, etc.).

Pour l’élaboration des modèles de prévision, nous avons seulement retenu les pré-

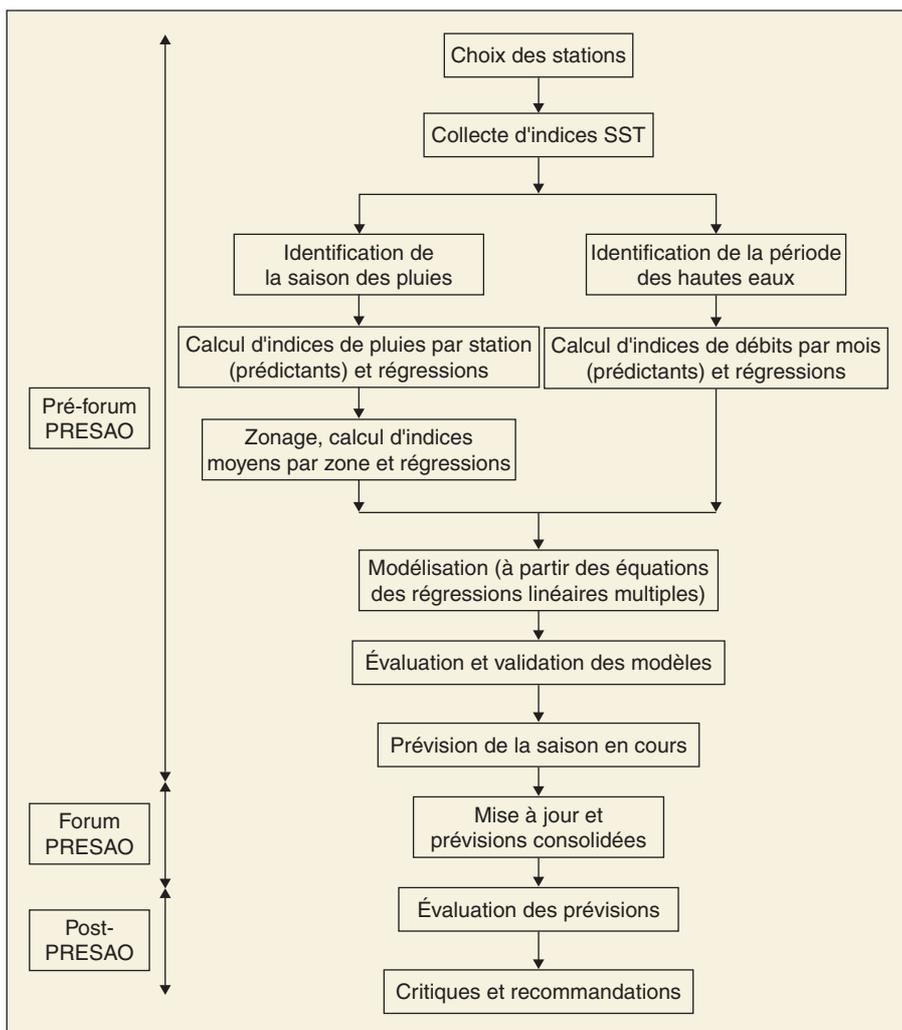


Figure 5. Procédure du processus PRESAO (PREvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest).

dicateurs dont les corrélations sont significatives à plus de 95 % (moins de 5 % de chance d'être dues au hasard).

### Évaluation des prévisions climatiques

L'objectif de cette évaluation est d'établir une base nous permettant d'apporter des jugements sur la fiabilité des prévisions saisonnières et, le cas échéant, d'explorer d'éventuelles voies d'amélioration.

Les modèles proposés sont établis sur la période 1961-1990. Deux évaluations ont été abordées.

- La première est une approche purement statistique qui a consisté à comparer les prévisions aux observations sur la période d'apprentissage (1961-1990).
- La seconde tient compte du caractère climatique des saisons (à travers une classification des séries observées et prévues en 3 catégories : sèche, normale et humide), également sur la période d'apprentissage.

Pour permettre l'évaluation des prévisions, des critères ont été définis : pourcentage de coïncidence (C), probabilité de détection d'une année sèche ou humide (POD), fausse alerte du premier ordre (FAR) et performance du modèle (HSS) (tableau I).

Nous avons présenté les résultats d'évaluation à l'échelle des zones climatiques constituées pour les prévisions des pluies et à l'échelle des bassins-versants pour les prévisions des écoulements [14].

Nous présentons aux figures 6 à 10 quelques résultats comparés (à partir des modèles de l'ACMAD et des modèles proposés) des différents paramètres d'évaluation des modèles de prévisions (POD, FAR, HSS) ainsi que des résultats d'évaluations comparées des prévisions saisonnières sur la période 1991-1997 à l'aide des modèles de l'ACMAD et de ceux proposés dans cette étude.

Les indices de débits des stations étudiées sont pour la plupart situés entre - 1 et + 1 pendant la période d'apprentissage-

calage (1961-1990). Les modèles élaborés sont donc influencés par cette situation, ce qui fait que pendant la période d'évaluation (1991-1997), toute année particulièrement sèche ou humide (indice largement supérieur à 1 en valeur absolue) fait apparaître un décrochage qui diminue la qualité des prévisions (figure 9).

La figure 10 présente les indices de débits observés et prévus par les modèles PRESAO et les modèles proposés sur le Chari-Logone à N'djamena, de 1991 à 1997.

Par rapport aux performances des modèles (tableau II), nous avons apporté une amélioration pour la quasi-totalité des stations étudiées. Les forts taux d'amélioration du HSS (jusqu'à 425 %) sont obtenus pour les débits du fleuve Niger à Kouroussa (tableau III), ce qui paraît intéressant quand on sait que parfois les résultats des prévisions hydrologiques en territoire guinéen sont utilisées pour déduire le comportement hydrologique du Niger sur l'étendue du territoire guinéen, à défaut de données actualisées pour tout le bassin.

Ces améliorations résultent simultanément de la démarche (analyse statistique et zonage), de l'indicateur rajouté (*Upwelling* atlantique équatorial) et aussi de la technique de comblement des lacunes de certaines séries utilisées.

Seule une étude menée séparément sur chacun des paramètres sus-cités peut nous renseigner sur son apport individuel en termes d'amélioration, ce qui n'a pas été fait dans le cadre de notre étude.

## Interprétation des résultats

### Prévision saisonnière des pluies

- Les corrélations entre les indices SST-Niño et les indices de pluies au Mali confirment l'action inhibitrice [15, 16] du phénomène El Niño sur les précipitations en Afrique sahélienne.

Les corrélations sont assez bonnes avec des coefficients compris entre - 0,3 et - 0,6. Notons qu'au PRESAO la limite d'acceptation est fixée entre  $\pm 0,30$  à  $\pm 0,40$ .

- Avant l'installation de la saison des pluies, une partie des stations pluviométriques présente de bonnes corrélations avec les indices SST de l'océan global. Pendant la saison des pluies, période synchrone à l'extension la plus au nord de la mousson ouest-africaine, presque toutes les stations présentent de bonnes corrélations avec les anomalies de SST de l'océan global.

En effet, l'action de l'océan global sur les précipitations dans la zone étudiée, à travers la circulation générale, est une synthèse d'actions des différents océans. Cela

Tableau I. Définition des paramètres d'évaluation des modèles.

		Prévisions			Total
		Sèche	Normale	Humide	
Observations	Sèche	N11	N12	N13	$\sum_{j=1}^3 N1j$
	Normale	N21	N22	N23	$\sum_{j=1}^3 N2j$
	Humide	N31	N32	N33	$\sum_{j=1}^3 N3j$
	Total	$\sum_{i=1}^3 Ni1$	$\sum_{i=1}^3 Ni2$	$\sum_{i=1}^3 Ni3$	$\sum_{i=1}^3 Ni$
<b>Taux de coïncidence</b>		$C = \frac{\sum_{i=1}^3 Nij}{N}$			
<b>Probabilité de détection</b>		$POD(\text{sèche}) = \frac{N11}{\sum_{j=1}^3 N1j}$		$POD(\text{humide}) = \frac{N33}{\sum_{j=1}^3 N3j}$	
<b>La fausse alerte</b>		$FAR(\text{sèche}) = \frac{N31}{\sum_{i=1}^3 Ni1}$		$FAR(\text{humide}) = \frac{N13}{\sum_{i=1}^3 Ni3}$	
<b>Le Hit Skill Score</b>		$HSS = \frac{\sum_{i=1}^3 Nij - \frac{N}{3}}{N - \frac{N}{3}} = \frac{3}{2} \times C - \frac{1}{2}$			

Tableau II. Performances des modèles pour quelques débits de cours d'eau évaluées par HSS (Hit Skill Score).

Stations Hydro	Bagoé à Pankourou		Chari-Logone à Ndjamena		Chari à Sarh		Niger à Kouroussa	
	Modèles PRESAO	Modèles proposés	Modèles PRESAO	Modèles proposés	Modèles PRESAO	Modèles proposés	Modèles PRESAO	Modèles proposés
Août	25	34	40	41	41	68	19	39
Septembre	62	67	44	41	32	41	15	56
Octobre	55	56	40	41	45	45	10	41
Novembre	32	40	14	49	38	49	8	42
Moyenne	17	47	31	53	50	53	23	41

PRESAO : PRÉvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest.

Tableau III. Taux d'amélioration des HSS des modèles de l'étude par rapport aux modèles de l'African Centre of Meteorological Application for Development (ACMAD).

Stations Hydro	Bagoé à Pankourou	Chari-Logone à N'djamena	Chari à Sarh	Niger à Kouroussa
<b>Modèles</b>				
Août	36*	3	66	105
Septembre	8	-7	28	273
Octobre	2	3	0	310
Novembre	25	250	29	425
Moyenne	176	71	6	78

$$* \text{ Valeur}(\%) = \frac{\text{ValeurETUDE} - \text{ValeurPRESAO}}{\text{ValeurPRESAO}} \times 100$$

ValeurETUDE : HSS du modèle de l'étude ; ValeurPRESAO : HSS du modèle PRESAO. HSS : Hit Skill Score ; PRESAO : PRÉvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest.

peut expliquer sa prédominance sur les autres indicateurs.

• L'Upwelling équatorial présente une situation particulière. Durant toute la pé-

riode de prévisions, les corrélations sont très significatives avec deux tendances : positives avant les pluies, et négatives pendant l'hivernage.

• L'Atlantique équatorial sud représente un indicateur significatif avec des corrélations supérieures à 0,4.

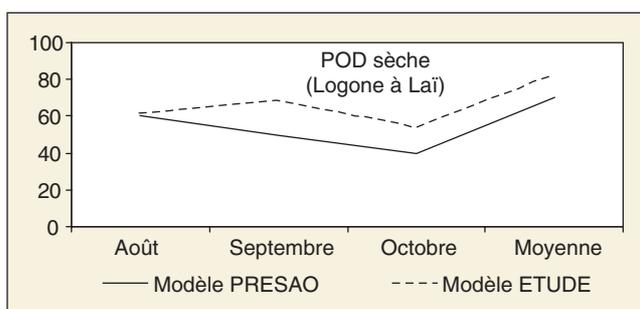


Figure 6. Probabilités de détection des saisons sèches (POD).  
PRESAO : PREvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest.

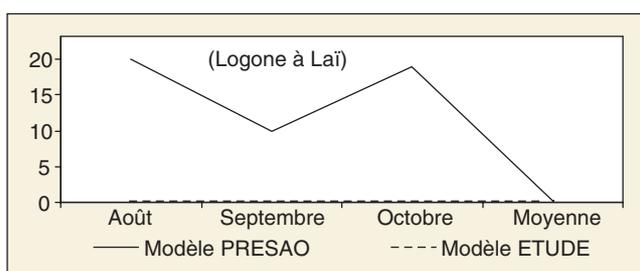


Figure 7. Fausses alertes (FAR sèche).  
PRESAO : PREvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest.

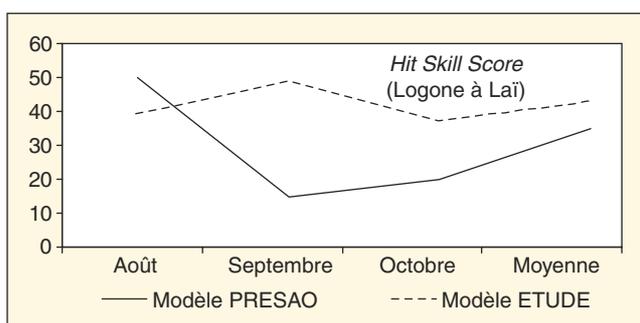


Figure 8. Performances des modèles (HSS, Hit Skill Score).  
PRESAO : PREvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest.

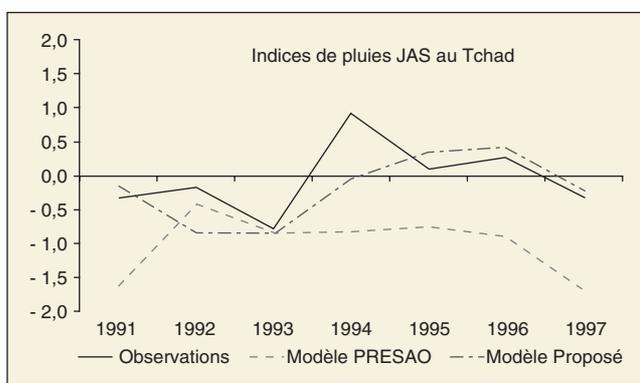


Figure 9. Évaluation des modèles de prévision saisonnière des pluies.  
PRESAO : PREvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest ; JAS : juillet à septembre.

- Les SST de l'Atlantique nord-ouest montrent de faibles corrélations avec les précipitations dans les pays tests pour la période, juste avant et pendant la saison des pluies. Cependant aux mois de février-mars et octobre (période non pluvieuse), les corrélations entre SST et pluies augmentent légèrement, bien qu'elles restent inférieures ou égales à 0,3. Ce phénomène peut être lié à l'activité au-dessus de cet océan, qui donne lieu à l'anticyclone des Açores, faible pendant la période JAS, mais fort en février-mars, période précédant le mois le plus chaud et sec au Sahel.

À l'issue des différentes régressions, nous avons retenu comme meilleurs prédicteurs : le Niño, l'océan global, l'Upwelling Atlantique équatorial et l'Atlantique équatorial sud.

### Prévision saisonnière pour l'hydrologie

Nous obtenons de très bonnes corrélations entre les débits des stations hydrométriques étudiées et les anomalies de températures de surface de l'océan global, l'Atlantique équatorial sud et l'Upwelling équatorial. Quant à l'Atlantique nord-ouest, des corrélations significatives sont observées seulement en février-mars, période correspondant à la position extrême sud de la zone de convergence intertropicale.

Les modèles élaborés à l'issue de ces corrélations sont assez fiables, comme le montrent les paramètres de validation (tableau IV). On a en général :

- 0 à 2 fausses alertes tous les dix ans ;
  - 33 à 92 % de possibilité de détecter une année sèche ou humide ;
  - les performances des modèles (HSS) varient entre 31 et 68 % pour l'hydrologie, et entre 40 et 63 % pour les pluies.
- Signalons que pour tous les pays tests, les séries de données hydrométriques utilisées pour caler les modèles vont jusqu'à l'année 1995. Donc la période 1991-1997 considérée pour l'évaluation des prévisions hydrologiques, appartient en partie à la période de calage des modèles, en ce sens que les résultats présentés ici expriment les coefficients de corrélations multiples entre observations et prévisions des modèles.

Le décalage trop prononcé entre les prévisions des modèles PRESAO et les observations réalisées peut s'expliquer par les raisons suivantes :

- Les critères d'acceptation des modèles par le PRESAO sont trop larges [17] : un modèle est validé si son pourcentage de coïncidence (C) est supérieur à 30 %, sa probabilité de détection d'une année sèche (POD) supérieure à 30 % et sa fausse alerte (FAR) inférieure à 30 %.

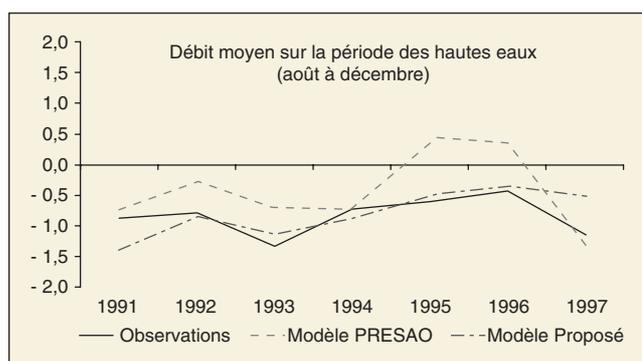


Figure 10. Évaluation des prévisions saisonnières des débits.  
PRESAO : PREvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest.

Or le HSS est l'apport d'un modèle par rapport à un événement aléatoire (pour lequel  $HSS = 0$ ). De par la formule :  $HSS(\%) = (1.5 \times C - 0.5) \times 100$ , le pourcentage de coïncidence ( $C$ ) doit être supérieur à 33 % (au lieu de 30 % seulement) pour que le modèle n'exprime pas un fait aléatoire.

- Le second point qui conditionne la fiabilité des modèles concerne le zonage (groupement des stations à caractères climatiques identiques afin de constituer des zones homogènes du point de vue climat). En effet, il n'y a aucune règle générale pour regrouper les stations en zones clima-

Tableau IV. Récapitulatif et comparaison des paramètres d'évaluation des modèles de prévisions hydrologiques.

Stations	Paramètres Modèles	C (%)	HSS (%)	Faible hydraulicité				Forte hydraulicité					
				POD (%)		FAR (%)		POD (%)		FAR (%)			
<b>Bahr-Sara à Manda</b>	Juil	<b>61</b>	<b>42</b>	<b>58</b>	<b>00</b>	<b>77</b>	<b>00</b>	<b>77</b>	<b>08</b>	<b>12</b>			
	Août	54*	<b>61**</b>	31	<b>42</b>	67	67	13	<b>00</b>	67	<b>77</b>	<b>08</b>	12
	Sept.	54	<b>63</b>	31	<b>45</b>	<b>75</b>	69	<b>00</b>	08	<b>75</b>	62	<b>07</b>	08
	Oct	<b>69</b>	66	<b>53</b>	49	67	67	00	00	<b>92</b>	67	12	<b>08</b>
	Nov	53	<b>63</b>	30	<b>45</b>	55	<b>64</b>	08	<b>00</b>	<b>82</b>	<b>85</b>	14	<b>00</b>
	Moy	50	<b>71</b>	25	<b>57</b>	64	<b>67</b>	00	00	55	<b>85</b>	00	<b>00</b>
<b>Chari-Logone à N'djamena</b>	Août	60	<b>61</b>	40	<b>41</b>	67	<b>85</b>	07	<b>00</b>	<b>83</b>	58	<b>08</b>	<b>00</b>
	Sept	<b>63</b>	61	<b>44</b>	41	67	<b>83</b>	00	00	<b>75</b>	69	00	00
	Oct	60	<b>61</b>	40	<b>41</b>	62	<b>75</b>	00	00	<b>75</b>	62	00	00
	Nov	43	<b>66</b>	14	<b>49</b>	42	<b>75</b>	00	00	67	<b>69</b>	00	00
	Déc	57	<b>74</b>	36	<b>61</b>	64	<b>69</b>	18	<b>00</b>	<b>75</b>	<b>92</b>	12	<b>00</b>
	Moy	54	<b>68</b>	31	<b>53</b>	50	<b>92</b>	00	00	<b>83</b>	62	00	00
<b>Chari à Sarh</b>	Août	61	<b>79</b>	41	<b>68</b>	58	<b>85</b>	09	<b>00</b>	<b>80</b>	69	00	00
	Sept	55	<b>61</b>	32	<b>41</b>	67	<b>69</b>	<b>08</b>	10	<b>73</b>	58	<b>08</b>	<b>00</b>
	Oct	<b>64</b>	63	45	45	64	<b>69</b>	00	00	<b>91</b>	67	<b>06</b>	<b>00</b>
	Nov	58	<b>66</b>	38	<b>49</b>	64	<b>77</b>	17	<b>00</b>	<b>82</b>	67	<b>07</b>	<b>00</b>
	Déc	58	<b>68</b>	38	<b>53</b>	64	<b>77</b>	20	<b>00</b>	64	<b>67</b>	00	00
	Moy	67	<b>68</b>	50	<b>53</b>	64	<b>85</b>	00	00	<b>82</b>	69	00	00
<b>Bagoé à Pankourou</b>	Juil	55	54	<b>33</b>	31	<b>54</b>	45	27	<b>25</b>	69	<b>75</b>	19	<b>11</b>
	Août	50	<b>56</b>	25	<b>34</b>	<b>46</b>	18	07	<b>00</b>	<b>85</b>	67	13	<b>00</b>
	Sept.	75	<b>78</b>	63	<b>67</b>	62	<b>70</b>	00	00	<b>92</b>	82	00	00
	Oct	70	<b>71</b>	55	<b>56</b>	62	<b>73</b>	00	00	<b>77</b>	75	00	00
	Nov	55	<b>60</b>	33	<b>40</b>	43	<b>50</b>	00	10	<b>85</b>	73	00	00
	Déc	65	<b>69</b>	48	<b>53</b>	<b>54</b>	45	10	<b>00</b>	69	<b>91</b>	00	00
Moy	45	<b>65</b>	18	<b>47</b>	38	<b>58</b>	00	00	54	<b>73</b>	00	00	
<b>Niger à Kouroussa</b>	Juil		<b>56</b>		<b>34</b>		<b>57</b>		<b>00</b>		<b>38</b>		<b>11</b>
	Août	46	<b>60</b>	19	<b>39</b>	<b>43</b>	33	25	<b>20</b>	<b>62</b>	38	<b>08</b>	<b>00</b>
	Sept.	44	<b>71</b>	16	<b>56</b>	31	<b>79</b>	15	<b>07</b>	<b>69</b>	62	<b>15</b>	17
	Oct	40	<b>61</b>	10	<b>41</b>	63	<b>71</b>	14	<b>08</b>	25	<b>50</b>	14	<b>00</b>
	Nov	39	<b>62</b>	09	<b>42</b>	<b>69</b>	58	23	<b>00</b>	39	<b>45</b>	23	<b>12</b>
	Moy	49	<b>61</b>	24	<b>41</b>	43	<b>54</b>	25	<b>10</b>	62	<b>64</b>	17	<b>14</b>
<b>Logone à Lai</b>	Juil		<b>61</b>		<b>42</b>		<b>67</b>		<b>00</b>		<b>50</b>		<b>00</b>
	Août	<b>67</b>	59	<b>50</b>	39	60	<b>62</b>	20	<b>00</b>	<b>80</b>	67	<b>09</b>	17
	Sept.	43	<b>66</b>	15	<b>49</b>	50	<b>69</b>	10	<b>00</b>	40	<b>69</b>	00	09
	Oct	47	<b>58</b>	20	<b>37</b>	40	<b>54</b>	18	<b>00</b>	<b>70</b>	62	<b>00</b>	09
	Nov		<b>58</b>		<b>37</b>		<b>50</b>		<b>00</b>		<b>62</b>		00
	Moy	57	<b>62</b>	35	<b>43</b>	70	<b>83</b>	00	00	40	<b>54</b>	<b>00</b>	09

C : taux de coïncidence ; HSS : Hit Skill Score ; POD : probabilité de détection d'une année sèche ; FAR : fausse alerte. \* : Modèles PRESAO (PREvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest) ; \*\* : Modèles proposés.

tiques. Certains experts procèdent au zonage suivant les réponses à un ou plusieurs prédictors, d'autres suivant l'hydroclimat de la région.

## Conclusion et perspectives

La variabilité climatique est gouvernée par les circulations dues aux phénomènes de convection, de subsidence et des flux des moussons. Dans la sous-région ouest-africaine, les effets de la variabilité climatique se font sévèrement ressentir. Le retard et la baisse de la pluviométrie qui en résultent ont pris des proportions inquiétantes depuis les années 1970.

Le processus PRESAO constitue une solution d'approche pour anticiper le caractère climatique (sec ou humide) de la saison à venir, à travers la prévision d'indices pluviométriques et hydrologiques. Ainsi, des mesures peuvent être prises afin d'atténuer les conséquences qui en résulteront. Une fois prédit l'état de la saison à venir, on peut donner aux agriculteurs et autres producteurs les conseils adaptés.

Au vu des avantages que présentent les prévisions, il convient d'élaborer des modèles sur la base des variables qui expliquent le mieux les précipitations et les écoulements des grands fleuves ouest-africains.

À l'issue de cette étude, nous sommes parvenus à améliorer les prévisions dans les pays tests, en raison d'une part des corrélations significatives entre indices pluviométriques et hydrologiques, et anomalies des températures de surface de l'*Upwelling* équatorial, et d'autre part de la méthode de zonage adoptée et des critères d'acceptation de modèles beaucoup plus sévères que ceux utilisés dans le cadre du PRESAO.

Tous ces points démontrent une instabilité des modèles PRESAO. Cela dit, on doit prendre en compte toutes ces insuffisances pour l'élaboration des prochains schémas de prévisions pour la sous-région ouest-africaine.

Dans une perspective d'amélioration des scores de prévisions, nous recommandons l'exploration d'autres fenêtres océaniques de par leurs connexions avec les précipitations sahéliennes [18, 19] et d'autres prédictors comme le JET (Jet d'Est tropical), le JEA (Jet d'Est africain), la vapeur d'eau dans le JEA [2]. On peut également explorer d'autres indicateurs tenant compte des conditions de surface continentale tels que l'énergie statique humide [20] qui intervient à la surface du continent et dans les basses couches [21].

Enfin, les précipitations dues aux complexes convectifs de méso-échelle représentent en Afrique de l'Ouest le principal signal d'entrée des modèles hydrologiques [5, 22]. Il est donc nécessaire de

disposer de séries de données aussi longues et denses que possible pour tester la stabilité des modèles de prévisions sur différentes périodes et palier les problèmes de représentativité spatio-temporelle des sorties des modèles. ■

## Remerciements

Nous remercions le Laboratoire HydroSciences de Montpellier, le ministère des Affaires étrangères français et l'Unesco à travers le programme FRIEND-AOC de l'Unesco pour le soutien logistique et financier, et les personnes suivantes pour leurs conseils, directives et moyens logistiques mis à notre disposition : M. Alhassane Adama Diallo, Directeur du Centre régional AGRHYMET de Niamey, Niger ; le Dr Mathieu Badolo du Centre régional AGRHYMET ; le Dr Philippe Gineste du programme ROSEI au Niger ; M. Amadou Lamine Mar de l'École d'ingénieurs de l'équipement rural (EIER) à Ouagadougou, Burkina Faso ; et M. Abdallah Nassor de l'Acmad au Niger.

## Références

1. Servat E. *Identification et conséquences d'une variabilité du climat en Afrique de l'Ouest non sahélienne (ICCCARE)*. Sl : Antenne hydrologique, Orstom-Côte d'Ivoire, 1994 ; 23 p.
2. Mahé G, Olivry JC. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse* 1995 ; 6 : 109-17.
3. Mugnier S. *Pluviométrie journalière et types de pluies au Sahel central : Manga et Bornu (Niger et Nigeria). Évolution de 1950-1990*. DEA Climats et contraintes climatiques, université de Bourgogne, centre de recherche de climatologie, 1995.
4. Servat E, Hughes D, Fritsch JM, Hulme M. *Water resources variability in Africa during the XXth century. IAHS publication no. 252*. Wallingford (Royaume-Uni) : International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 1998 ; 462 p.
5. Janicot S. Spatiotemporal Variability of West African Rainfall. Part II : Associated Surface and Airmass Characteristics. *J Clim* 1990 ; 5 : 499-511.
6. Janicot S, Fontaine B. L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie* 1993 ; 8 : 28-53.
7. Olivry JC. Évolution récente des régimes hydrologiques en Afrique intertropicale. In : Griselin M, ed. *L'eau la terre et les hommes, hommage à René Frécaut*. Nancy : Presses universitaires de Nancy, 1993.
8. Amani A. La prévision saisonnière de la saison des pluies en Afrique de l'Ouest. *Bull Int Centre Régional Agrhymet* 1999 ; 4 : 6-11.

9. Baldy C. Le bulletin climatique mensuel de l'OMM et la prévision mondiale des phénomènes de sécheresse. *Sécheresse* 1995 ; 6 : 364-5.

10. Laborde JP, Mouhous M. *Logiciel Hydrolab, version 98.2*. Sl : Centre national de la recherche scientifique (CNRS), équipe Gestion et valorisation de l'environnement, UMR 5651 « Espace », 1998.

11. African Centre of Meteorological Application for Development (ACMAD). *Prévision climatique pour l'hydrologie en Afrique*. WMO/TD No.982. Niamey (Niger) : ACMAD, 1999 ; 84 p.

12. Landsea WC, Gray WM. The strong Association between Western Sahelian Monsoon Rainfall and Intense Atlantic Hurricanes. *J Climate* 1991 ; 5 : 435-53.

13. Moron V. *Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au nord de l'équateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océanique et la dynamique de l'atmosphère*. Dijon : Centre de recherche de climatologie, 1994 ; 219 p.

14. Hamatan M. *Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest*. Mémoire de DEA, université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 2002, 112 p.

15. Fontaine B, Janicot S, Moron V, Roucou P, Trzaska S. Anomalies de température de surface de la mer et précipitations tropicales. Synthèses de quelques travaux récents portant sur les précipitations au Sahel et dans le Nordeste. *La Météorologie* 1998 ; 8 : 14-35.

16. Philippon N, Fontaine B. Un nouveau schéma de prévision statistique des précipitations sahéliennes de juillet-septembre (1968-1994). *CR Acad Sci Paris, Sciences de la terre et des planètes* 1999 ; 329 : 1-6.

17. African Centre of Meteorological Application for Development (ACMAD). *Prévision climatique en Afrique*. WMO/TD No.927. Niamey (Niger) : ACMAD, 1998 ; 209 p.

18. Mahé G, Citeau J. Relations océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson atlantique. Schéma général et cas particulier de 1984. *Veille Climatologique Satellitaire* 1993 ; 44 : 34-54.

19. Mahé G, L'Hôte Y, Olivry JC, Wotling G. Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa - 1951-1989. *Hydrological Sci J* 2001 ; 46 : 211-26.

20. Fontaine B, Philippon N, Camberlin P. An improvement of June-September rainfall forecasting in the Sahel based upon region April-May moist static energy content (1968-1997). *Geophys Res Lett*. 1999 ; 26 : 2041-4.

21. Dhonneur G. *Traité de météorologie tropicale*. Paris : Météo-France, 1985 ; 50 p.

22. Ouedraogo M. *Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale*. Thèse doctorat, université de Montpellier II, 2001, 257 p.