

Modifications des températures et des précipitations sur le Bani, un sous-bassin du fleuve Niger

JEAN-EMMANUEL PATUREL^{1,2} & MALICKI ZOROM²

1 IRD/HSM, 01 BP 182, Ouagadougou, Burkina Faso

jean-emmanuel.paturel@ird.fr

2 2iE, Rue de la Science, 01 BP 594, Ouagadougou, Burkina Faso

Résumé L'Afrique a connu depuis 1970 une modification importante de son climat. Elle s'est traduite par une diminution brutale des précipitations mais aussi par une augmentation des températures. L'étude s'est intéressée à 36 indices climatiques calculés à partir des données météorologiques journalières de pluie et de température concernant le bassin du Bani au Mali (130 000 km²). La description fine de l'évolution du climat de cette région depuis 1950 a été menée en termes d'analyse statistique de variables moyennes mais aussi de variables extrêmes. Les résultats montrent des changements significatifs des extrêmes de température associés à un réchauffement en particulier pour les indices dérivés des températures minimales journalières. L'ensemble de la zone d'étude montre une diminution significative du nombre annuel de nuits froides et une augmentation significative du nombre annuel de nuits chaudes. Les indices dérivés de la température maximale journalière montrent bien moins de différences significatives. Les changements des indices dérivés des précipitations montrent une tendance à la baisse. Globalement, les changements sont intervenus d'abord sur les indices relatifs à la pluie (autour de 1970) puis sur les indices relatifs à la température (autour de 1980).

Mots-clefs séries chronologiques; analyse statistique; changement climatique; pluie; température; Bani

Changes in temperature and precipitation in the Bani watershed, a sub-basin of the Niger River

Abstract Since 1970 Africa has experienced a significant change in climate. It has resulted in a sharp decrease in rainfall but also an increase in temperature. The study looked at 36 climate indices derived from daily meteorological data of rainfall and temperature in the basin of the Bani in Mali (130 000 km²). The detailed description of the evolution of the climate in this area since 1950 has been conducted in terms of statistical analysis of mean variables but also extreme variables. Results show significant changes in temperature extremes associated with warming, especially for those indices derived from daily minimum temperature. The entire study area shows a significant decrease in the annual occurrence of cold nights and a significant increase in the annual occurrence of warm nights. Indices derived from daily maximum temperature show less significant differences. Changes in precipitation derived indices show a downward trend. Globally, the changes occurred first on the indices related to rain (around 1970), and then on the indices related to temperature (around 1980).

Keywords chronological series; statistical analysis; climate change; rainfall; temperature; Bani

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le fleuve Bani est le plus important affluent du fleuve Niger dans sa partie supérieure, en amont du Delta Intérieur du Niger. Le bassin du Bani s'étend sur quatre pays de l'Afrique de l'Ouest (Fig. 1): Mali, Côte d'Ivoire, Guinée Conakry et Burkina Faso. A Sofara (14°N; 4.6°W), à quelques kilomètres de l'exutoire du bassin, en amont de la confluence avec le Niger, sa superficie est de l'ordre de 130 000 km². Le bassin est sous l'influence de trois régimes pluviométriques différents; du nord au sud, sahélien, soudano-sahélien et guinéen. Le Sud reçoit environ 1 800 mm/an alors que le nord reçoit 470 mm/an (période de référence: 1950–2006).

DONNEES ET METHODES

Données

La pluie et la température sont les principales variables qui déterminent le climat. Plusieurs études ont analysé les modifications en moyenne survenues sur ces variables. Les études sont plus rares en ce qui concerne les extrêmes car elles nécessitent d'avoir des données journalières disponibles, ce qui est parfois une gageure dans certaines parties du monde.

La présente analyse s'appuie sur des données de pluie (P) et de température (T) journalière recueillies, respectivement, en 10 et 6 stations situées, du nord au sud, sur 5 "horizontales" qui

suivent les isohyètes de la région: Mopti (R et T); Ségou (P et T), San (P et T) et Tougan (P); Koutiala (P et T); Bougouni (P et T), Sikasso (P et T) et Ferkessédougou (P); Kankan (P) et Odienné (P). La partie sud du bassin est assez mal couverte par les postes sélectionnés mais cela est compensé par le nombre important de postes qui se trouve à l'extérieur du bassin. Concernant les 10 stations, le Tableau 1 donne des caractéristiques des séries annuelles.



Fig. 1 Carte d'implantation des stations de mesure de pluie et de température et réseau hydrographique du bassin du Niger et de son sous-bassin, le Bani.

Tableau 1 Caractéristiques des séries chronologiques utilisées.

Station	Pays	Latitude	Longitude	Pluie		Température	
				Début	Fin	Début	Fin
Mopti	Mali	14.5	-4.1	1950	1996	1950	2006
Ségou	Mali	13.4	-6.15	1950	2005	1950	2006
San	Mali	13.3	-4.8	1950	2005	1950	2006
Koutiala	Mali	12.4	-5.45	1950	2005	1950	2006
Bougouni	Mali	11.4	-7.5	1950	2005	1950	2006
Sikasso	Mali	11.35	-5.7	1950	2005	1950	2006
Tougan	Burkina Faso	13.1	-3.05	1950	1986		
Ferkessédougou	Côte d'Ivoire	9.6	-5.2	1950	1987		
Odienné	Côte d'Ivoire	9.5	-7.55	1950	1995		
Kankan	Guinée Conakry	10.4	-9.3	1950	1990		

Différentes vérifications des fichiers de données de température et de pluie ont permis d'éliminer des pluies et températures négatives (impossible dans le contexte géographique) et des températures maximales inférieures aux températures minimales (et inversement). Les "outliers" (les valeurs comprises à l'extérieur de $[\text{moyenne} \pm 4 \times \text{écart-type}]$) ont été examinés plus particulièrement mais, la plupart du temps, peu d'éléments réellement objectifs nous permettent d'éliminer ces valeurs. Ce travail a été mené visuellement et à l'aide de l'outil RCLimDex de l'ETCCDMI (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/>; Alexander *et al.*, 2006).

A partir des données journalières de pluie et de température, des indicateurs annuels ont été calculés à l'aide des outils RCLimDex, Excel ou développés sous Delphi. Quinze indicateurs liés à la température et vingt-et-un indicateurs liés à la pluie ont ainsi été définis, soit cent-quarante-sept variables liées à la température et cinquante-quatre variables liées à la pluie. Ces indicateurs sont

des caractéristiques moyennes et extrêmes qui décrivent la dynamique du climat de la zone d'étude: totaux pluviométriques, nombres de jours de pluie, catégories de jours pluvieux, caractéristiques de saison des pluies, caractéristiques de séquences sèches ou humides, caractéristiques d'événements moyens et extrêmes, températures moyennes et extrêmes et écarts journaliers de température à différents pas de temps: quantième, pentade, mois ou annuel.

Analyse statistique

L'analyse statistique de séries chronologiques de données hydrométéorologiques est un des outils d'identification de variations climatiques. Cette analyse consiste le plus souvent à la mise en œuvre et à l'interprétation de tests statistiques d'homogénéité des séries.

Les tests suivants ont été retenus dans le cadre de nos travaux: le test de corrélation sur le rang (Kendall & Stuart, 1943; WMO, 1966) qui teste le caractère aléatoire ou non de la série (test non paramétrique) et le test de Pettitt (Pettitt, 1979) qui teste la présence ou l'absence de rupture (changement de moyenne au sein de la série); il fournit en plus une date de rupture (test non paramétrique).

Nous renvoyons à ces différents auteurs pour une description détaillée de ces tests. Le choix des 2 tests résulte de différents travaux plus ou moins théoriques (Lubès-Niel *et al.*, 1998; Renard, 2006) qui abordent: (1) la robustesse de ces tests qui permet de s'assurer du respect du risque de 1ère espèce spécifié associé à l'hypothèse nulle; (2) la puissance de ces tests qui permet de détecter correctement une tendance ou une rupture dans le cadre de l'hypothèse nulle.

La présence d'une autocorrélation influe fortement sur la robustesse et la puissance des tests. En terme de puissance, des recherches théoriques ont montré la supériorité des tests paramétriques par rapport aux tests non paramétriques mais cet avantage disparaît si les données ne suivent pas une distribution normale. Cela explique pourquoi la plupart des études de stationnarité s'appuient sur des tests non paramétriques. Par ailleurs, les tests de détection de tendance sont aussi puissants que les tests de détection de rupture pour détecter une rupture centrale, mais l'inverse n'est pas vrai.

L'outil RClmDex permet également de déterminer des tendances au sein des séries chronologiques d'indices en se basant sur une méthode non paramétrique d'estimation de la pente de cette tendance proposée par Wang & Swail (2001).

Pour l'ensemble de cette étude, le niveau considéré de significativité des tests est de 5%.

RESULTATS

Globalement (Tableau 2), il y a plus de modifications touchant les variables relatives à la température (#2/3) que celles relatives à la pluie (#1/3). Pour les indicateurs liés à la pluie, les tendances ou ruptures sont majoritairement négatives; et inversement pour les indicateurs liés à la température.

Tableau 2 Résultats des tests statistiques sur les séries annuelles d'indicateurs de pluie et de température: pourcentages de réponse au test de corrélation sur le rang (pas de tendance / tendance) et au test de Pettitt (Pas de Rupture / Rupture).

Stations	Variables pluie			Variables température		
	Tendance négative (%)	Tendance positive (%)	Rupture	Tendance négative (%)	Tendance positive (%)	Rupture
Bougouni	16.7%	11.1%	27.8%	9.0%	33.8%	47.6
Koutiala	24.1%	16.7%	33.3%	11.6%	48.3%	61.9
Mopti	27.8%	18.5%	37.0%	16.3%	62.6%	77.6
San	18.5%	14.8%	27.8%	11.6%	51.0%	64.6
Ségou	25.9%	18.5%	35.2%	12.2%	70.1%	86.4
Sikasso	25.9%	14.8%	33.3%	11.0%	34.9%	56.5
Tougan	24.1%	16.7%	33.3%			
Ferkessédougou	31.5%	3.7%	31.5%			
Odienné	27.8%	11.1%	40.7%			
Kankan	31.5%	14.8%	40.7%			

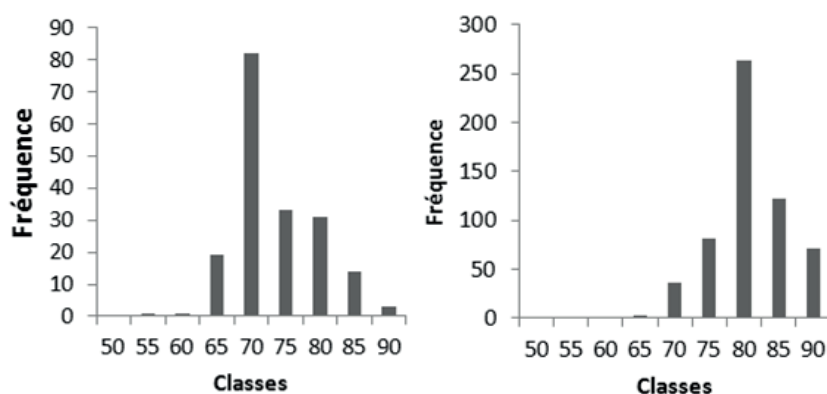


Fig. 2 Résultats du test de Pettitt: histogrammes de fréquence des dates de rupture détectées sur les séries annuelles d'indicateurs de pluie (à gauche) et de température (à droite).

La Figure 2 montre que les changements sont intervenus d'abord sur les variables relatives à la pluie (autour de 1970) puis sur les variables relatives à la température (autour de 1980).

La Figure 3 présente des valeurs moyennes des séries d'anomalies pour le bassin du Bani. Il y a en réalité une forte variabilité spatiale de l'intensité de ces anomalies d'une station à l'autre. Les stations les plus touchées, selon les indicateurs de pluie se situent dans la partie sud et est du bassin. Les stations les plus touchées selon les indicateurs de température sont Mopti et Ségou, le long du fleuve Niger.

Parmi les indicateurs relatifs à la pluie (Fig. 3), les principaux changements s'observent sur les totaux précipités annuels et mensuels de fin de saison des pluies. La saison des pluies se termine de façon plus précoce mais le signal n'est pas toujours très net. Les nombres annuels et mensuels de jours de pluie suivent les totaux de pluie. Toutes les catégories de jours de pluie, de peu pluvieux à très pluvieux, sont en diminution. Les séquences sèches au sein de la saison des pluies s'allongent.

Parmi les indicateurs relatifs à la température (Fig. 3), ce sont les températures minimales journalières qui sont les plus touchées: elles augmentent nettement alors que les températures maximales ne varient guère, entraînant un écart de température diurne à la baisse.

On remarque que les totaux pluviométriques annuels et le nombre de jours de pluie ont eu tendance depuis 1995 à présenter une variabilité beaucoup plus importante qu'auparavant mais cela ne semble pas avoir eu d'impact sur d'autres caractéristiques pluviométriques ou de température.

Le Tableau 3 (résultats du test proposé par RCLimDex) présente des tendances significativement négatives pour les indicateurs liés à la précipitation sur l'ensemble des stations alors que les indicateurs liés à la température présentent une tendance positive dans la quasi-totalité des stations. Les résultats de cette approche confirment les résultats obtenus antérieurement.

CONCLUSION

Cette étude est un travail préliminaire qui a permis de mettre au point ou de tester certains outils d'analyse de données moyennes et extrêmes de pluie et de température.

Depuis 1950, les résultats montrent que le bassin du Bani a été le lieu de changements significatifs des extrêmes de température associés à un réchauffement en particulier pour les indices dérivés des températures minimales journalières. L'ensemble de la zone d'étude montre une diminution significative du nombre de nuits froides et une augmentation significative du nombre de nuits chaudes. Les indices dérivés de la température maximale journalière montrent bien moins de différences significatives. Les changements des indices dérivés des précipitations montrent une tendance à la baisse.

Il est à noter que les changements ont concerné les variables relatives à la pluie avant les variables relatives à la température. Cet écart de près de 10 ans peut s'expliquer par le probable rôle tampon joué par la végétation de la zone d'étude.

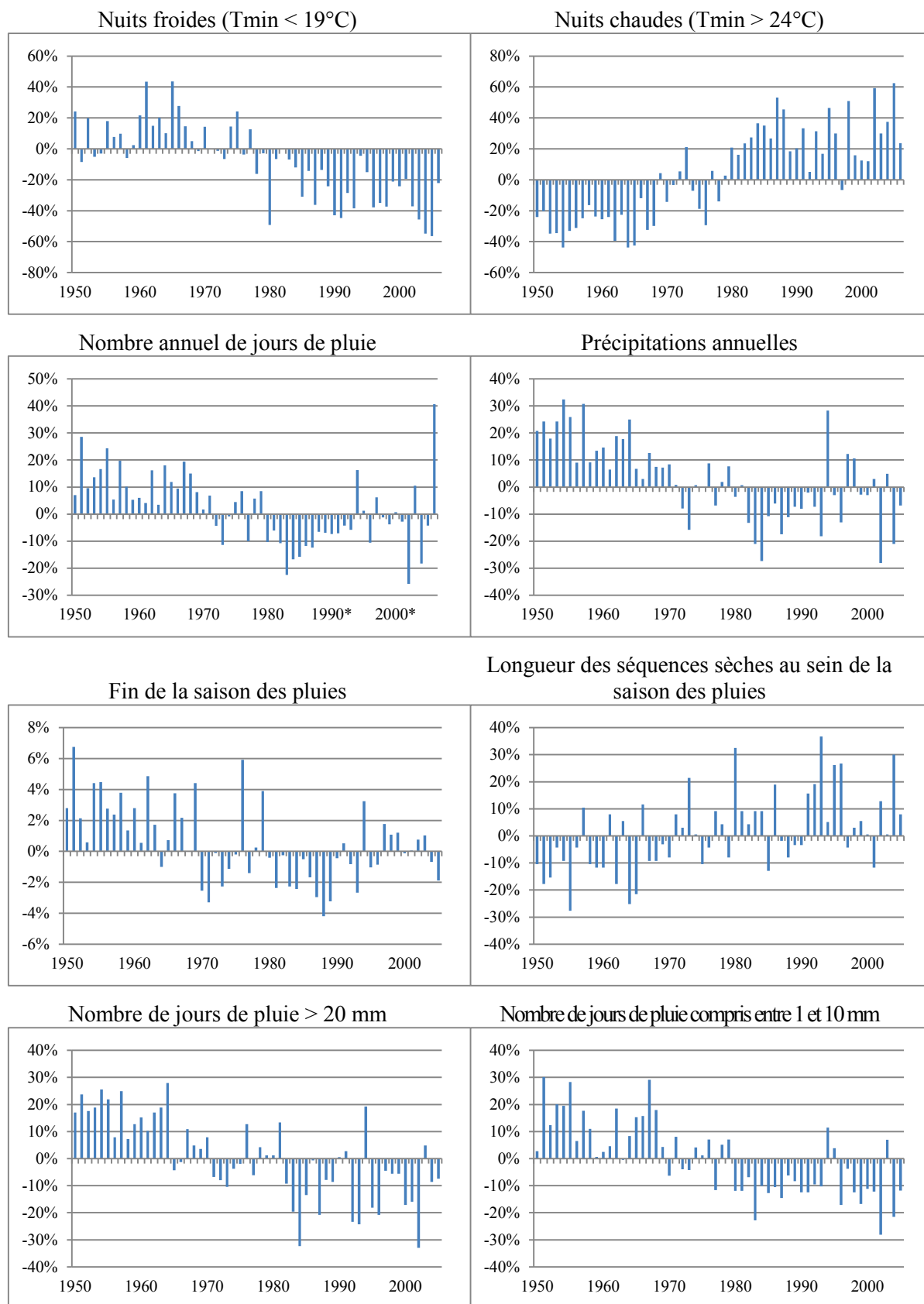


Fig. 3 Bassin du Bani – Séries chronologiques moyennes annuelles d'anomalies relatives à la période 1960–1990 pour différents indicateurs relatifs à la pluie et à la température.

Tableau 3 Résultats de RelimDex: pourcentage de stations présentant des tendances significatives au sein des chroniques d'indices de précipitations (10 stations) et de températures (6 stations).

Indicateurs	Nombre de stations à tendances significativement négatives	Nombre de stations à tendances significativement positives
Pluie annuelle (pluie > 1 mm)	10	
Cumul pluviométrique max sur 5 jours consécutifs	4	
Jours de pluie > 5mm	10	
Jours de pluie > 10mm	9	
Jours de pluie > 20mm	6	
Jours de pluie > 40mm	3	
Pluie moyenne journalière (pluie > 1mm)	1	1
Ecart diurne de température	5	
Min Tmin		6
Max Tmax		1
Max Tmin		10
Jours chauds (>38°C)		3
Jours froids (<29°C)	3	
Nuits chaudes (>24°C)		6
Jours froids (<18°C)	5	

Ce travail sera poursuivi en se focalisant plus sur l'évolution des tendances ces quinze dernières années car les différentes observations semblent montrer un retour à des conditions plus moyennes (moyenne 1950–1990) pour les indices liés à la pluie et un infléchissement des indices liés à la température.

RÉFÉRENCES

- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rustucucci, M. & Vazquez-Aguirre, J. L. (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 111, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Kendall S. M. & Stuart A. (1943) *The Advanced Theory of Statistics*. Charles Griffin, London, UK. Vol. 1, 2 & 3, 472 p., 723 p., 585 p.
- Lubès-Niel H., Masson J.-M., Paturol J.-E. & Servat E. (1998). Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, 3, 383–408.
- Pettitt, A. N. (1979) A non parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* 28(2), 126–135.
- Renard B. (2006) Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse INP Grenoble, 364 p.
- Wang, X. L. & V. R. Swail (2001). Changes of extreme wave heights in Northern Hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes. *Journal of Climate* 14, 2204–2220.
- WMO (1966) Climatic change by a working group of the commission for climatology. WMO 195, TP 100, Tech. note n°79. WMO Geneva, Switzerland.