

Agronomie et climatologie d'un bassin de 100 000 km² en Afrique de l'Ouest

S. LOUVET¹, K. DELARUE¹, J. E. PATUREL¹, G. MAHE², M. VAKSMAN³,
L. TIGANADABA³, N. VIGAUD⁴, P. ROUCOU⁴, N. ROUCHE¹ & M. KOITE⁵

¹ HSM/IRD, Montpellier, France
samuel.louvet@gmail.com

² HSM/IRD, Rabat, Maroc

³ IER/CIRAD, Bamako, Mali

⁴ CRC, Dijon, France

⁵ DNM, Bamako, Mali

Résumé Les régions sahéennes sont considérées comme étant particulièrement vulnérables à la variabilité et au changement climatique pour deux raisons: le rôle prédominant de l'agriculture pluviale dans son économie et la faiblesse des structures de gestion. La réponse physiologique d'une plante aux variations climatiques est bien documentée mais l'extrapolation à une production alimentaire régionale reste encore très incertaine. Sur le Bani, affluent du fleuve Niger, des variables climatiques représentatives des contraintes agroclimatiques des cultures (dynamique de la saison des pluies et occurrence des événements extrêmes) ont été calculées à partir de données observées ou estimées à partir de données climatiques du futur (modèle régional climatique WRF). Des corrélations simples et multiples ont été établies entre les données du passé et des séries de rendements agricoles mais les résultats aboutissent à des régressions guère significatives. Le facteur climatique est une condition nécessaire mais non suffisante pour expliquer les rendements agricoles dans ces régions d'Afrique.

Mots clefs agroclimatologie; analyse statistique; rendement agricole; Sahel

Agronomy and climatology of a 100 000 km² watershed in West Africa

Abstract Sahelian regions are considered as particularly vulnerable to climatic variability and change for two reasons: the dominant role of rainfed agriculture in their economies and their weakness of water resources management. The physiological response of an individual plant to the climatic variations of parameters is well documented, but extrapolation to regional food production still remains very dubious. On the Bani, a tributary of the Niger River in Mali, climatic variables representative of the agroclimatic constraints of the cultures (dynamics of the rainy season and occurrence of extreme events) were evaluated from observed past data and simulated future data (regional climatic model WRF). Simple and multiple correlations were established between past data and agricultural yields, but the relations are hardly significant. In these regions in Africa, the climate factor is certainly a necessary condition to explain the agricultural outputs, but not sufficient alone.

Key words agricultural yields; agroclimatology; Sahel; statistic analysis

INTRODUCTION

Le secteur agricole dans les états d'Afrique de l'Ouest est le moteur du développement économique. À la base également de multiples enjeux sociétaux, l'agriculture est en effet indispensable aux économies nationales, à l'emploi, aux revenus et à la sécurité alimentaire des populations (CEDEAO, 2004). Le secteur agricole assure en premier lieu une fonction économique en contribuant à hauteur de 35% à la formation du produit intérieur brut régional. L'agriculture joue également un rôle déterminant dans la lutte contre la pauvreté et l'insécurité alimentaire. En 2004, 80% des besoins alimentaires des populations de la région étaient satisfaits par les productions régionales.

Le Sahel apparaît comme très vulnérable à la variabilité et au changement climatique parce que certaines de ses caractéristiques physiques et socio-économiques le prédisposent à être affecté par les effets négatifs des variations du climat (Niasse *et al.*, 2004). En effet, ces changements climatiques risquent d'avoir des incidences considérables sur les économies des pays concernés en raison du rôle prépondérant de l'agriculture pluviale (avec seulement 4% des terres arables du Sahel qui sont irriguées) dans les économies sahéennes et la faiblesse du niveau de maîtrise de l'eau au Sahel. D'ailleurs, Sivakumar (1993) lie le changement climatique et les variations de production agricole en Afrique de l'Ouest et notamment en zone Soudano-sahéenne.

Basée le plus souvent sur des études à court terme et contrôlées, la compréhension de la réponse physiologique d'une plante individuelle aux variations climatiques de température, de précipitation, d'humidité du sol et de l'air est bien documentée. Cependant l'extrapolation et la généralisation à des conditions de terrain à grande échelle où à une production alimentaire régionale restent encore très incertaines.

D'un point de vue climatologique, nous avons défini quelles pourraient être les variables agroclimatiques qui auraient un impact sur la croissance des cultures et donc leur rendement. Une analyse de leur évolution passée et future (sortie du modèle climatique régional Weather Regional Forecast (WRF)) sera alors menée sur le bassin du Bani, bassin vital pour l'économie du Mali.

Ensuite, en confrontant ces données à des données de rendement de certaines cultures, on essaiera d'établir des relations simples afin de pouvoir déterminer quel pourrait être l'impact du changement climatique sur le système de production alimentaire.

CONTEXTE CLIMATIQUE DES DERNIERES DECENNIES

Les précipitations ouest-africaines ont fortement fluctué au cours du siècle passé (Fig. 1). Jusqu'en 1970, la pluviométrie annuelle été globalement excédentaire sur la période 1950–1970 alors qu'à partir de 1970, elle devenue dramatiquement déficitaire. Depuis 1990–1995, une légère reprise des pluies semble s'observer (Mahé & Paturel, 2009). A une échelle plus fine, Ali *et al.* (2008) montrent que ce retour temporaire à des conditions plus pluvieuses n'est pas identique sur tout le Sahel et observent une reprise plus marquée dans sa partie Est.

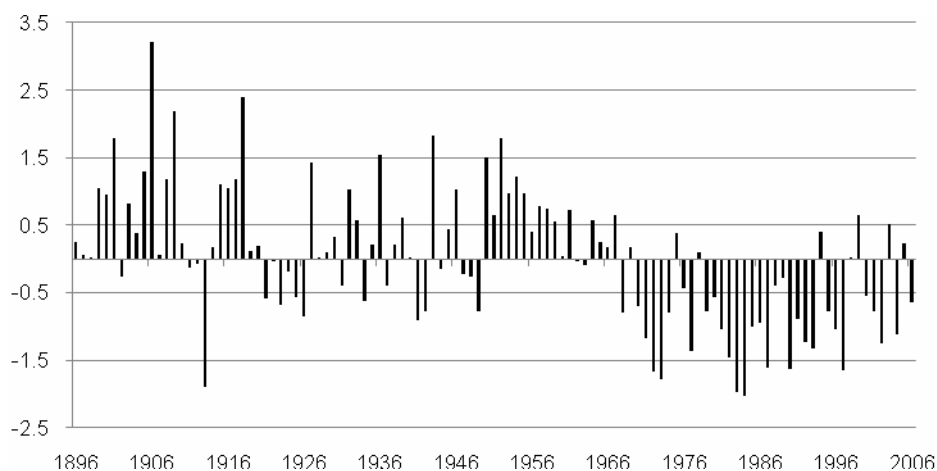


Fig. 1 Ecart standard des pluies annuelles moyennes aux stations sahéliennes (pluviométrie entre 200 et 700 mm sur la période 1921–2006) de St Louis (Sénégal) à N'Djamena (Tchad).

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE – DONNEES

Situation géographique

Le bassin du Bani s'étend sur une superficie d'environ 130 000 km² et constitue le principal affluent du fleuve Niger dans sa partie supérieure (Fig. 2). Environ 85% du bassin se situe au sud du Mali et les 15% restants sont situés au Burkina Faso, au nord de la Côte d'Ivoire et en Guinée Conakry. Il est le poumon économique du Mali. La particularité climatique de la zone est la mise en place de la mousson, dynamique caractérisée par un balancement latitudinal saisonnier de la Zone de Convergence Intertropicale.

Données pluviométriques

La présente étude se base sur deux jeux de données météorologiques quotidiennes. L'un est issu des observations de 90 stations de mesures pour une chronique 1950–2006, et l'autre provient

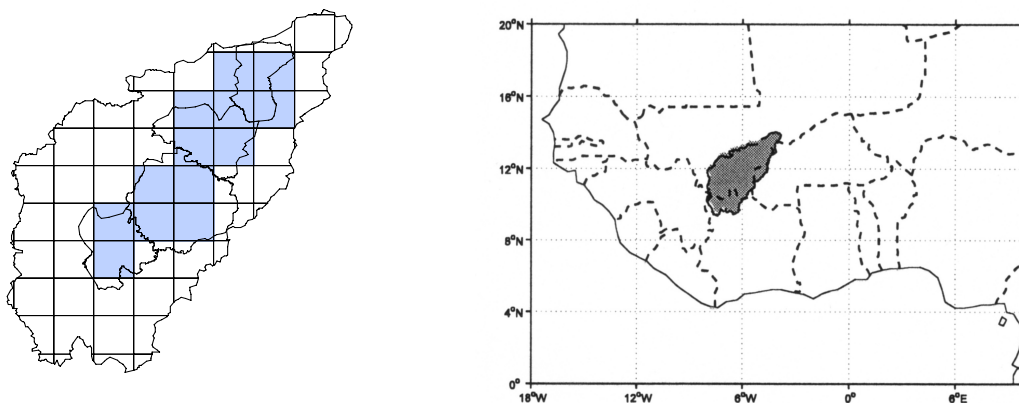


Fig. 2 Situation géographique du bassin versant du Bani et principaux cercles administratifs de la zone d'étude: du Nord au Sud, San, Koutiala, Sikasso et Kolondieba.

d'une sortie d'un modèle climatique pour une chronique 2031–2042. Les données sont spatialisées par la méthode du plus proche voisin à une résolution de mailles régulières de 0.5° de côté (64 mailles sur le bassin du Bani), soit une surface de représentativité des valeurs d'environ 2500 km^2 .

Les données journalières observées proviennent des services nationaux des pays concernés. Les données ont été vérifiées mais on ne peut assurer une totale exemption d'erreurs dans le fichier utilisé.

Les données journalières du futur ont été générées par le Centre de Recherche de Climatologie à partir du modèle climatique régional WRF en prenant pour période de référence la décennie 1981–1990 (Vigaud *et al.*, 2009). Aux bornes du domaine, le modèle régional a été alimenté par le modèle Arpège-Climat de Météo-France (scénario "A2") qui fournit une réponse similaire à la moyenne des autres modèles GCM. Les données ont été corrigées par la méthode "delta" (Déqué, 2007) qui permet de conserver la variabilité de la simulation et permet de rendre les données quantitativement comparables avec la période 1981–1990.

Donnés agricoles

Les données disponibles sont constituées de statistiques officielles agricoles de différents pays à l'échelle de "cercles", découpage administratif au Mali (Fig. 1). Elles nous renseignent sur les rendements de cultures pour la période 1985–1993. Les cultures retenues pour cette étude sont les suivantes: le Mil, cultivé principalement au nord du bassin, le coton et le maïs, cultivés principalement au sud du bassin et le Sorgho qui est cultivé de façon assez uniforme sur le bassin.

DETERMINATION DES VARIABLES AGROCLIMATIQUES UTILISEES

Certains stades phénologiques des plantes étudiées sont vulnérables à des paramètres environnementaux (Sivakumar, 1993) comme la pluie, la température, la sécheresse, etc. Il ressort que, pour le sud du Mali, des variables conditionnent le potentiel de productivité de ces cultures: principalement, le cumul pluviométrique et la dynamique de la saison des pluies (début, fin et durée). De même, il apparaît aussi que des événements climatiques extrêmes (pluies ou périodes de sécheresse exceptionnelles) peuvent entraîner des pertes de rendement.

Chacune de ces caractéristiques agroclimatiques a été estimée sur les 64 mailles régulières qui constituent le bassin du Bani. Les périodes sur lesquelles s'effectuent les calculs sont 1951–2000 et 2032–2041.

Dynamique de la saison des pluies

Un grand nombre de méthodes existe dans la littérature pour déterminer les dates de début et de fin de saison des pluies en terme agronomique.

Afin de simuler au mieux une date proche de celle du semis des paysans, la date de début de la saison des pluies est définie par les conditions suivantes: à partir du 92^{ème} jour; cumul de pluie en 3 jours supérieur ou égal à 20 mm; pas de période sèche de plus de 7 jours consécutifs dans les 30 jours qui suivent la date obtenue. Ces différents paramètres ont le mérite d'éviter les faux départs de semis (période pluvieuse de début de saison suivie d'une période sèche qui détruit les semences ou jeunes pousses) des paysans, ceci tout en n'employant que des paramètres climatiques.

La date de fin de la saison des pluies est obtenue à l'aide d'une méthode basée sur le bilan hydrique d'un sol fictif de réserve utile (RU) fixée arbitrairement sur la totalité de la zone d'étude à 100 mm: $\Delta s = P - ETR$ où Δs : variation du stock en eau du sol; P: pluie; ETR: évapotranspiration réelle de la culture fixée arbitrairement à 5 mm par jour pour toute la saison des pluies.

La date de fin de la saison des pluies est définie par les conditions suivantes: à partir du 245^{ème} jour (1^{er} septembre); lorsque le stock hydrique est égal à 0 mm; pas de pluie importante dans les 20 jours qui suivent la date obtenue par les conditions précédentes, auquel cas on retient la date de l'évènement pluvieux.

Cumuls de pluies

L'une des variables climatiques essentielles dans l'estimation des rendements agricoles reste le cumul pluviométrique. Les cumuls saisonniers et annuels ont été retenus.

Evènements climatiques extrêmes

Les caractéristiques intra-saisonnières de la saison des pluies sont souvent plus importantes que les seuls totaux précipités.

On définit une séquence sèche par le nombre de jours supérieur ou égal à 10 jours consécutifs sans pluies supérieures à 5 mm. Le nombre de séquences sèches a été déterminé sur la saison des pluies moins le dernier mois. On peut également déterminer la durée de la séquence sèche la plus longue pour cette période.

On définit un évènement extrême un jour de pluviométrie supérieure à 50 mm. On a déterminé le nombre de ces évènements survenus dans le dernier mois de la saison et le cumul journalier de l'évènement le plus important.

ANALYSE DES DONNEES OBSERVEES ET FUTURES

Les variables agroclimatiques dont les variations relatives sont les plus significatives (test *t* de Student au niveau de confiance de 90%) sont reportées dans la Fig. 3.

La première observation qui peut être faite est que les changements détectés ne sont pas homogènes dans l'espace.

Les principales caractéristiques de la pluie (cumul, dynamique saisonnière, séquences sèches) ont principalement évolué entre la période 1951–1970 et 1971–1980 (1^{ère} colonne): diminution des cumuls pluviométriques et de la durée de la saison des pluies marquée par une fin de saison plus précoce et des périodes sèches au sein de la saison plus longues. En ce qui concerne la dynamique saisonnière, les tendances relevées auparavant ont persisté sur la période suivante (période 1981–1990, 2^{ème} colonne). Sur la période 1991–2000 (3^{ème} colonne), les évolutions ont changé de signe: le cumul pluviométrique et la durée de la saison des pluies ont augmenté, tout en restant en deçà du niveau que ces variables avaient sur la période 1951–1970.

Selon le modèle WRF, à l'horizon 2032–2041, peu de variations par rapport à la période 1981–1990 s'observent: seules trois variables évoluent de façon significative. Il apparaît que le nord du bassin connaîtra une de saison plus tardive et que les cumuls saisonniers seront plus importants sur 30% des points de grille environ. Rappelons toutefois que ces variations sont calculées par rapport à la décennie la moins arrosée du 20^{ème} siècle et que ramenées à la période 1951–1970, les variations sont faibles. Les hauteurs précipitées des évènements pluviométriques extrêmes du dernier mois de la saison des pluies seront selon ce scénario bien plus importantes mais aux franges est et sud du bassin.

REGRESSIONS DONNEES OBSERVEES/DONNEES AGRICOLES

La méthode de régression du “stepwise ascendant” nous a permis d'établir des relations entre la variable expliquée (rendement agricole) et les variables explicatives (variables agroclimatiques précédemment définies). Cette opération a été effectuée sur l'ensemble des couples culture/cercle.

Le synthétise les résultats significatifs au sens statistique (90%) obtenus pour les régressions simples. Un coefficient de corrélation <0 (resp. >0) signifie que les rendements agricoles augmentent quand la variable explicative diminue (resp. augmente) et inversement.

La détermination de régressions multiples n'a pas permis d'améliorer les régressions simples obtenues: cela n'a été valable que pour trois couples sur les 16 analysés.

Les résultats sont très disparates, d'une culture à une autre, d'un “cercle” à un autre. Une tendance semble cependant se dégager: globalement, les variables agroclimatologiques choisies n'apparaissent pas comme discriminantes des rendements agricoles. Elles le sont plus au nord du bassin, peu arrosé: les cultures ont quand même besoin d'eau!

CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif premier de pouvoir estimer dans le futur (à l'horizon 2032–2041) quels pourraient être les rendements de certaines cultures importantes au Mali en fonction des seules contraintes climatiques. Mais les résultats montrent que le climat seul ne peut pas expliquer les rendements agricoles, du moins pas dans notre zone d'étude. Les contraintes climatiques conditionnent cependant la production agricole dans le sens où les rendements seront faibles en cas de conditions climatiques très mauvaises alors qu'ils seront potentiellement élevés si elles sont bonnes. Dans le cas où les conditions climatiques sont bonnes, les rendements seront aussi conditionnés par d'autres variables qui pourront éventuellement les faire varier de très bons à moins bons.

Le contexte économique et social de la zone sahéenne fait que les agriculteurs ne peuvent disposer des outils techniques et technologiques nécessaires pour garantir de bons rendements face à la variabilité climatique et leurs techniques agricoles peuvent apparaître rudimentaires, voire archaïques. En dépit de ce qui est souvent écrit et dit, le milieu sahéen a, cependant, supporté une variabilité climatique historique (variabilités interannuelles et sécheresses) sans précédent ces dernières décennies, ce qui montre la capacité des systèmes de production à produire, à surmonter voire à s'adapter à un éventuel changement climatique. C'est une force des systèmes extensifs sur les systèmes intensifs modernes, plus productifs mais plus fragiles. La stratégie agricole des agriculteurs africains (réponse qu'apporte l'agriculteur à son niveau pour assurer une utilisation durable des terres et garantir la sécurité alimentaire de sa famille) est donc bien souvent leur seule arme disponible pour s'adapter à cette variabilité climatique. Cette stratégie est sans aucun doute l'un des paramètres essentiels à prendre en compte pour mieux évaluer les rendements agricoles.

Si la stratégie agricole est certainement le point fort des paysans, l'apport de fertilisant (surtout phosphore et azote) en augmentant l'efficacité de l'eau a aussi un impact important sur la production. La recherche agronomique a également mis à disposition sur le marché de nouvelles variétés qui résistent mieux aux conditions climatiques difficiles mais leur utilisation reste souvent trop confinée à des aires géographiques très spécifiques. Les accroissements de production pour quelques cultures au cours des dernières décennies sont dus davantage à l'accroissement des superficies qu'à l'augmentation des rendements. Les surfaces cultivées se sont ainsi accrues de 229% (entre 1988 et 2008) et sont à la source de 70% de l'accroissement de l'offre régionale (CEDEAO, 2004)

Cette étude montre la difficulté, voire l'impossibilité, de travailler sur la donnée rendement d'une culture sans prendre en compte différents éléments que sont la stratégie paysanne, le type de culture, les variétés génétiques de culture.

REFERENCES

- Ali, A., Lebel, T. & Amani, A. (2008) Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Sécheresse* **19**, 227–235.
- CEDEAO (2004) Cadre de politique agricole pour l'Afrique de l'Ouest-ECOWAP. Document de référence. CEDEAO, Juillet 2004, 166 p.
- Déqué, M. (2007) Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global Planet. Change* **57**, 16–26.
- Mahé, G. & Paturel, J. E., (2009) 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *CR Geoscience* **341**, 538–546.
- Niasse M., Afouda A. & Amani A. (2004) Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification: Eléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation. UICN Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 71p.
- Sivakumar M. V. K. (1993) Global climate change and production in the Sudano-Sahelian zone of West Africa. *International Crop Science* **1**, 251–255.
- Vigaud, N., Roucou, P., Fontaine, B., Sijikumar, S. & Tyteca, S. (2009) WRF/ARPEGE-CLIMAT simulated climate trends over West Africa. *Climate Dynamics* **10**, doi:10.1007/s00382-009-0707-4.