



HAL
open science

Les bénéfices de la prévision saisonnière pour l'agriculture en Afrique de l'Ouest

Benjamin Sultan, Philippe Roudier, Philippe Quirion

► **To cite this version:**

Benjamin Sultan, Philippe Roudier, Philippe Quirion. Les bénéfices de la prévision saisonnière pour l'agriculture en Afrique de l'Ouest. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 2013, 24 (4), pp.304-13. 10.1684/sec.2013.0398 . hal-01137949

HAL Id: hal-01137949

<https://hal.science/hal-01137949>

Submitted on 31 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les bénéfices de la prévision saisonnière pour l'agriculture en Afrique de l'Ouest

Benjamin Sultan¹
Philippe Roudier²
Philippe Quirion²

¹ Université Pierre et Marie Curie
IRD - LOCEAN/IPSL
4, place Jussieu
75252 Paris cedex 05
France
<Benjamin.sultan@locean-ipsl.upmc.fr>
² CNRS
Cired
Nogent-sur-Marne cedex
Campus du Jardin Tropical
45 bis, avenue de la Belle Gabrielle
94736 Nogent-sur-Marne cedex
France
<roudier@centre-cired.fr>
<quirion@centre-cired.fr>

Résumé

Réduire l'insécurité alimentaire est un enjeu majeur pour le futur de l'Afrique subsaharienne où l'augmentation rapide de la population et les retombées potentiellement négatives du changement climatique menacent l'équilibre fragile du continent. Dans le domaine de l'agriculture, être en mesure d'anticiper les fluctuations climatiques quelques jours à quelques mois à l'avance peut faire une vraie différence dans les stratégies d'adaptation des populations africaines face à ces changements. Cependant, même s'il existe un système opérationnel de prévisions saisonnières de la mousson en Afrique de l'Ouest depuis 1998, il est difficile d'en évaluer les retombées réelles pour l'agriculture car la diffusion de ces prévisions et leur adoption par les agriculteurs sont trop partielles pour permettre une évaluation *ex post*. L'évaluation doit donc se faire de manière *ex ante* en utilisant des approches permettant d'évaluer les bénéfices des prévisions avant même leur adoption par les paysans. Cet article s'appuie sur deux études récentes pour faire une synthèse de ce type d'approches *ex ante* et de leurs résultats pour l'évaluation des bénéfices potentiels de l'utilisation de la prévision climatique pour les agriculteurs en Afrique de l'Ouest. Bien que portant sur des exploitations agricoles africaines où les conditions climatiques et socio-économiques sont différentes, les deux études ont montré que les agriculteurs peuvent tirer un bénéfice en termes d'augmentation de revenu et de réduction du risque grâce à l'utilisation de la prévision saisonnière en dépit de son incertitude et de son imperfection. Ce bénéfice diffère néanmoins selon le type d'années et le type d'exploitations considérées et ces différences soulignent la difficulté de généraliser les résultats sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest et le besoin de répéter ce type d'exercice en prenant soin de varier les conditions environnementales et socio-économiques des exploitations africaines. Enfin, même si son utilisation semble être bénéfique pour les agriculteurs, le système de prévisions saisonnières actuel a ses limites. En effet, il ne répond que partiellement aux attentes des utilisateurs en se focalisant sur le cumul pluviométrique saisonnier alors que les variables les plus pertinentes pour la stratégie agricole sont le démarrage et la fin de la saison des pluies ainsi que la distribution des pluies à l'intérieur de la saison de mousson.

Mots clés : Afrique de l'Ouest, agriculture, évaluation économique, prévisions saisonnières.

Abstract

The advantages of seasonal forecasting for West African agriculture

The future of sub-Saharan Africa depends on the capability of the agricultural sector to guarantee food security for the vast majority of the population while the rapid growth

Pour citer cet article : Sultan B, Roudier P, Quirion P, 2013. Les bénéfices de la prévision saisonnière pour l'agriculture en Afrique de l'Ouest. *Sécheresse* 24 : 304-13. doi : 10.1684/sec.2013.0398

Tirés à part : B. Sultan

of the population and climate change are threatening food production. The use of climate forecasts is a promising and costless option for the agricultural sector that might help African farmers to take crucial strategic decisions that would reduce their vulnerability and increase farm profitability. However, even if seasonal forecasts are made routinely in West Africa, adoption by farmers is too low to provide any reliable *ex post* evaluation that could assess observed outcomes following the adoption of actual forecast schemes. *Ex ante* evaluation (*i.e.*, assessing the benefits of forecasts in advance of their adoption by society) remains the best way to evaluate such forecasts in West Africa. The present paper uses two recent studies to illustrate this *ex-ante* approach for evaluating the advantages of using climate forecast in West Africa. Both studies found that farmers could gain benefit from using climate forecasts to orient tactical decision-making in Niger and Senegal. However, such benefits vary across the two locations in West Africa, pointing out the difficulty of generalizing this kind of study. Benefits are also sensitive to the type of year (*i.e.*, dry or wet) and to the quality of the forecasts. Benefits remain moderate since an important limitation of the current seasonal forecasts system is that it focuses on the forecasts of categories of seasonal rainfall amounts, which are less crucial for farmers than predicting the onset and/or the end of the rainy season and the distribution of rainfall within the season.

Keywords: agriculture, economic evaluation, seasonal forecasts, West Africa.

Réduire l'insécurité alimentaire est un enjeu majeur pour le futur de l'Afrique subsaharienne. En dépit d'une hausse de la production alimentaire, le très fort accroissement de la population a contribué à entraîner une augmentation du taux de pauvreté et de malnutrition en Afrique plus rapidement que n'importe où dans le monde. De plus, selon l'Institut national d'études démographiques ([Ined] ; Pison, 2011), la population de l'Afrique devrait plus que doubler d'ici 2050. Le futur de cette région dépend donc de la capacité du secteur agricole à relever le défi de nourrir une population qui croît rapidement. Or, ce défi sera d'autant plus difficile à relever que le changement climatique est aujourd'hui à l'œuvre et ne sera certainement pas sans conséquences sur l'agriculture, en Afrique comme ailleurs. Le quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a en effet alerté la communauté internationale à propos d'une augmentation de la température partout dans le monde ainsi que d'une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité des aléas météorologiques majeurs comme les sécheresses, citant l'Afrique comme le continent le plus vulnérable aux changements climatiques (Christensen *et al.*, 2007). La grande majorité des études prévoient ainsi que le changement climatique diminuera les rendements agricoles en Afrique (Müller, 2011 ; Roudier *et al.*, 2011a ; Knox *et al.*, 2012).

Être en mesure d'anticiper les fluctuations climatiques quelques jours à quelques mois à l'avance peut faire une vraie différence dans les stratégies d'adapta-

tion des populations africaines au changement climatique et constituer un premier pas pour augmenter les rendements et réduire les risques de crises alimentaires. En effet, l'agriculture pluviale étant extrêmement sensible aux aléas climatiques, l'agriculteur sahélien a développé une grande diversité de pratiques pour s'adapter à la forte variabilité climatique qu'il observe. Compte tenu des retombées potentiellement dramatiques d'une mauvaise saison des pluies (famines, migrations forcées), les pratiques de cet agriculteur sont souvent entachées d'une très forte aversion au risque (c'est-à-dire qu'il tend à éviter les choix présentant un risque de mauvaise récolte même s'ils sont plus productifs en moyenne [Affholder, 1997 ; de Rouw, 2003]). Si elles sont le plus souvent très efficaces, lui permettant de produire de quoi survivre en cas de sécheresse prolongée, elles limitent sévèrement le développement de son activité et le maintiennent dans la pauvreté (CGIAR, 2009). Pendant les bonnes années en termes de pluviométrie, sa production reste basse car il ne prend aucun risque pour profiter de ces conditions plus favorables (apports d'intrants, densification de semis, variété améliorée). De plus les changements socio-économiques (population qui augmente, compétition sur les ressources qui se raréfient) et la menace d'une variabilité climatique accrue en réponse au réchauffement global peuvent totalement remettre cette stratégie en question. L'information et la prévision climatique sont en mesure d'accompagner une nécessaire augmentation des rendements agricoles pour orienter les choix tactiques (à court terme comme le

choix de la variété, date de semis) et/ou stratégiques (à plus long terme comme le choix du système de culture).

Durant les vingt dernières années, en réponse aux grandes sécheresses de la fin des années 1960, un effort important a été mené pour transposer les résultats scientifiques sur la compréhension du système de mousson en termes de méthodes de prévision de la qualité de la saison de mousson des semaines avant son démarrage effectif. Les modèles climatiques les plus récents (Palmer *et al.*, 2004 ; Van der Linden et Mitchell, 2009) ou des modèles statistiques (Ward, 1998 ; Fontaine *et al.*, 1999 ; Ogallo *et al.*, 2000 ; Ward *et al.*, 2004) ont montré qu'ils étaient capables de prédire de manière satisfaisante les fluctuations du climat dans de nombreuses parties du monde (Hansen, 2002). Certaines de ces méthodes sont même maintenant utilisées dans un contexte opérationnel en Afrique subsaharienne (dans le cadre des forums PRESAO ([Prévision saisonnière en Afrique de l'Ouest], Hamatan *et al.*, 2004) et GHACOF (*Great Horn of Africa Climate Outlook Forum*). Ces forums réunissent les experts du climat et de la météorologie appartenant aux services météorologiques et hydrologiques nationaux pour réaliser au printemps une prévision de la saison à venir chaque année depuis 1998 (Ward *et al.*, 2004). Les services météorologiques nationaux diffusent ensuite cette prévision aux utilisateurs de manière à pouvoir orienter utilement la décision.

Cependant, rares sont les études qui mettent en évidence les bénéfices apportés par cette information climatique en Afrique de l'Ouest alors qu'elles

sont cruciales pour isoler les variables climatiques les plus pertinentes sur lesquelles la communauté des climatologues devrait se focaliser et pour permettre l'adoption de la prévision dans le processus de décision (Meza *et al.*, 2008 ; Sultan *et al.*, 2010). En effet, même si les prévisions saisonnières sont réalisées et diffusées tous les ans depuis 1998 en Afrique de l'Ouest, la diffusion de ces prévisions et leur adoption par les agriculteurs sont trop partielles pour permettre une évaluation *ex post* qui mesurerait les retombées réelles de l'utilisation des prévisions par les agriculteurs (Meza *et al.*, 2008). L'évaluation doit donc se faire de manière *ex ante* en utilisant des approches permettant d'évaluer les bénéfices des prévisions avant même leur adoption par les paysans (Meza *et al.*, 2008 ; Sultan *et al.*, 2010). Ces approches ont l'avantage de fournir des arguments chiffrés qui sont souvent nécessaires pour mobiliser des financements et des partenaires institutionnels. Elles peuvent également mettre en évidence les bénéfices liés à l'amélioration des systèmes de prévision actuels en testant par exemple l'opportunité de fournir aux utilisateurs de nouveaux produits adaptés à leurs besoins. Ce dernier point est particulièrement important en Afrique de l'Ouest où la prévision PRESAO se focalise presque exclusivement sur le cumul saisonnier des pluies alors qu'une prévision des dates de démarrage et de fin de la saison pluvieuse constitue une priorité parmi les attentes des agriculteurs (Ingram *et al.*, 2002).

Cet article s'appuiera sur deux études récentes (Sultan *et al.*, 2010 ; Roudier *et al.*, 2011b) pour faire une synthèse de ce type d'approches *ex ante* et de leurs résultats pour l'évaluation des bénéfices potentiels de l'utilisation de la prévision climatique pour les agriculteurs en Afrique de l'Ouest. Les différentes stratégies des agriculteurs africains en réponse à la prévision climatique seront présentées dans une première partie. La méthodologie des approches *ex ante* et leurs résultats quant aux bénéfices potentiels des prévisions climatiques pour les agriculteurs seront abordés respectivement dans les deuxième et troisième parties.

Définition de stratégies en réponse à la prévision climatique

Pour espérer tirer des bénéfices de l'utilisation de la prévision climatique,

il doit exister des décisions viables et sensibles au climat en réponse à la prévision (Hansen, 2002). Meza *et al.* (2008) soulignent à ce propos que les évaluations *ex ante* des prévisions saisonnières prennent généralement trop peu en compte ces stratégies d'adaptation en réponse à la prévision et sous-estiment ainsi la valeur de l'information diffusée. Pourtant, comme le montrent Luseno *et al.* (2003), l'étude des stratégies des agriculteurs est un point fondamental car la valeur finale de la prévision dépend principalement de la capacité de réaction des paysans. Le tableau 1 présente une synthèse des différentes stratégies que les agriculteurs africains pourraient mettre en œuvre s'ils disposaient de prévisions. Ainsi, selon Roncoli *et al.* (2009), les paysans burkinabè utiliseraient jusqu'à quatre stratégies différentes, avec 38 % d'entre eux seulement une stratégie et 27 % deux stratégies. Certaines études (O'Brien *et al.*, 2000, par exemple) concluent que ces prévisions saisonnières ne changent pas réellement les pratiques culturales : cela peut être dû au fatalisme, au manque de confiance, ou à la présence d'autres systèmes de prévisions locaux. Cependant, cela ne signifie pas nécessairement que la prévision saisonnière est inutile mais plutôt qu'il y a un problème avec le format de l'information ou que les agriculteurs ne lui accordent que peu de confiance. Celle-ci doit être facile à comprendre et doit surtout être donnée au moment opportun, c'est-à-dire au moins un mois avant le début de la saison (Ingram *et al.*, 2002), pour que les exploitants aient le temps d'acheter les semences et les intrants. Notons que la valeur d'une telle information dépend également du taux d'acceptation des usagers.

Roudier *et al.* (2011b) se sont servis de ce type d'enquêtes auprès des agriculteurs pour définir des stratégies types dans une exploitation agricole dans le Sud-Ouest du Niger (figure 1) où les paysans auraient tendance à changer la variété du mil, la date de semis et le niveau de fertilisation s'ils avaient des informations sur le début et la fin de la saison pluvieuse, la quantité totale de pluie et sa répartition dans la saison. Considérant une zone plus pluvieuse dans la région de Niourou du Rip au Sénégal (environ 700 mm/an ; figure 1) avec plus d'options d'adaptation, Sultan *et al.* (2010) ont privilégié les changements de type de cultures et le niveau de fertilisation parmi les stratégies mises en œuvre par les agriculteurs en réponse à la prévision climatique. Par exemple, la

culture du maïs avec un usage important de fertilisants pourrait être particulièrement adaptée en cas d'année humide alors qu'en raison de sa forte sensibilité au stress hydrique cette culture serait à éviter en cas d'année sèche.

Construction de modèles d'exploitation

Après avoir identifié les différentes stratégies d'adaptation des agriculteurs, l'approche d'évaluation *ex ante*, proposée par Wilks (1997) et plus récemment par Sultan *et al.* (2010) et par Roudier *et al.* (2011b) en Afrique de l'Ouest, consiste à élaborer un modèle d'exploitation. Ce type de modèle permet de mettre en évidence des stratégies d'exploitation optimale et de tester l'impact d'innovations comme l'utilisation des prévisions saisonnières tout en respectant les contraintes de l'exploitation (comme les revenus, le temps de travail disponible, la disponibilité des terres) et les règles de décision des exploitants. Ces modèles doivent être capables de : i) simuler les changements de rendements agricoles en réponse à des variations du climat et à des changements de pratiques agricoles ; et ii) de simuler les règles de prise de décisions des exploitants.

Simuler la réponse des rendements selon différents types d'itinéraires techniques et de climat

On distingue deux approches différentes visant toutes deux à quantifier la réponse de la productivité agricole aux variations climatiques et aux changements d'itinéraires techniques : la modélisation empirique ou statistique et la modélisation mécaniste.

• Les modèles empiriques

Des modèles agronomiques empiriques peuvent être construits à partir d'analyses statistiques reliant des observations agronomiques et des observations climatiques (voir par exemple Lobell *et al.* [2008] et Schlenker et Lobell [2010]). Cette approche, utilisée par Sultan *et al.* (2010) pour estimer les rendements moyens selon différentes catégories de saison des pluies, a l'avantage d'être relativement simple et rapide à mettre en place mais présente néanmoins des limites importantes. Elle nécessite d'abord des jeux de données agronomiques et météorologiques de qualité

Tableau 1. Revue des stratégies d'adaptation possibles en réponse aux prévisions saisonnières telles que citées par les agriculteurs et mentionnées dans plusieurs publications scientifiques récentes.

Étude	Pays	Stratégies d'adaptation	Commentaires
O'Brien <i>et al.</i> (2000)	Tanzanie, Namibie, Afrique du Sud	Changer la date de semis Changer l'emplacement de la culture Changer le type de culture <i>Intercropping</i> Utilisation d'engrais Stocker plus de nourriture Réduire les quantités plantées Arrêter les activités agricoles	De nombreux agriculteurs n'ont rien fait dans l'étude pilote
Tarhule et Lamb (2003)	Afrique de l'Ouest	Changer le type de culture Réduire la taille du troupeau Changer les méthodes de pâturage Changer la date de semis Déplacement	Hétérogénéité en Afrique de l'Ouest : Les Maliens sont moins sceptiques. Les résultats sont présentés ici pour le Niger
Ingram <i>et al.</i> (2002) ¹	Burkina Faso	Planter des cultures/variétés à cycle plus court Planter des cultures/variétés tolérantes à la sécheresse +/- de fumure et engrais chimiques Stocker/vendre les stocks de grain Orienter les sillons perpendiculairement à la pente Acquérir du capital pour acheter des intrants Rationner la nourriture	Les stratégies dépendent du type d'année (« bonne » ou « mauvaise »). Seules certaines stratégies sont indiquées ici
Ziervogel <i>et al.</i> (2005)	Lésotho	Ajuster la densité de semis Faire varier le ratio maïs/sorgho planté	Les deux paramètres sont utilisés dans un modèle. D'autres stratégies sont décrites brièvement
Luseno <i>et al.</i> (2003)	Éthiopie et Kenya	« Ajuster les choix cultureux »	« Moins de 10 % de ceux qui ont reçu les prévisions extérieures sur le cumul pluviométrique ont ajusté leur comportement en rapport'' »
Hassan et Nhemachena (2008)	Zones arides africaines	Diversification des cultures Utiliser différentes variétés Faire varier les dates de semis et de récolte Augmenter l'utilisation de l'irrigation Augmenter les techniques de conservations d'eau et du sol Faire de l'ombre Réduire la longueur de la période de croissance Se diversifier vers des activités non agricoles	37 % n'ont utilisé aucune stratégie d'adaptation

¹ D'autres stratégies sont décrites en page 343 de cet article selon le type de prévision.

sur de longues périodes, ce qui peut être difficile à obtenir en Afrique de l'Ouest, d'autant que lorsque l'on s'intéresse au rendement des cultures, un point de mesure correspond à une année entière.

Il est alors difficile de construire un modèle statistique robuste en séparant bien un échantillon de données pour calibrer le modèle et un autre échantillon indépendant pour le valider. Beaucoup

des modèles empiriques de la littérature peuvent dès lors surévaluer leur performance (« *overfitting* »). Par ailleurs, la plupart de ces modèles ont du mal à évaluer les effets non linéaires du climat

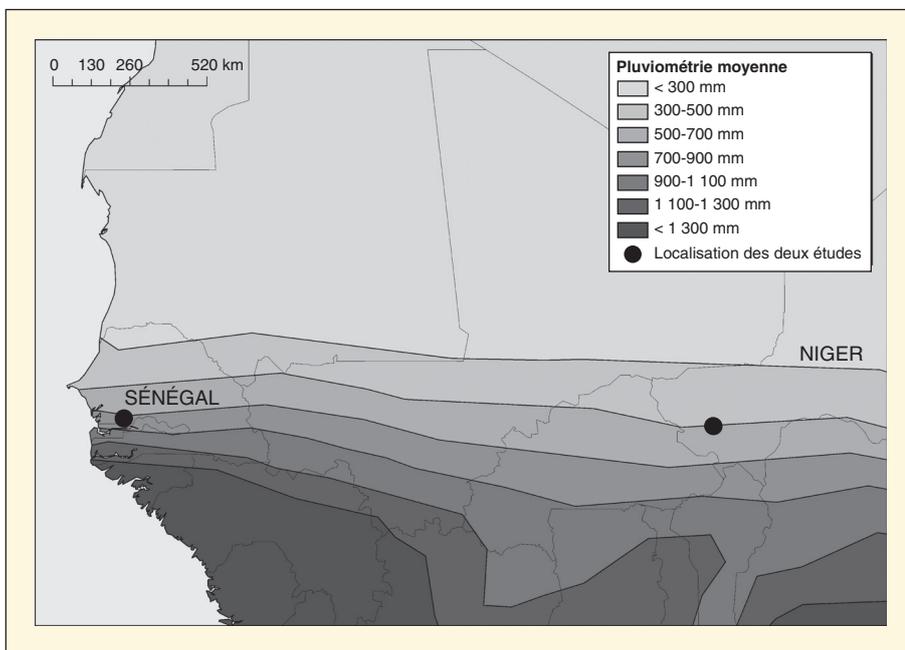


Figure 1. Carte de la pluviométrie annuelle moyenne sur la période 1970-2009 (données CRU 3.1) et localisation des deux sites en Afrique de l'Ouest.

sur le rendement et/ou ne prennent en compte que des variables climatiques agrégées sur la saison et négligent les effets des variations intrasaisonniers (séquences sèches, démarrage, longueur et fin de la saison).

- Les modèles mécanistes

La compréhension des interactions entre la plante, l'atmosphère et le sol a pris son essor dans les années 1980 à travers l'agrométéorologie. Les acquis de cette connaissance ont été formalisés grâce à l'avènement des moyens informatiques par des modèles de culture mettant en équation la réponse des plantes cultivées aux conditions environnementales et météorologiques. Ces modèles mécanistes permettent pour une culture et/ou une variété de culture donnée de simuler, généralement sur une base journalière, la croissance et le développement de la plante au cours de son cycle phénologique afin de prédire la production de biomasse et le rendement à la fin de la saison de culture. Il existe un grand nombre de ces modèles à complexité variable, certains génériques (pouvant s'appliquer à un grand nombre de cultures), d'autres spécifiques à un type de culture ou à une variété : par exemple EPIC (Williams *et al.*, 1984), CERES (Ritchie *et Otter*, 1985), WOFOST (Diepen *et al.*, 1989), CROPGRO (Boote *et al.*, 1998), STICS (Brisson *et al.*, 2002) ou encore APSIM (Keating

et al., 2003). Roudier *et al.* (2011b) utilisent le modèle SARRA-H (Dingkuhn *et al.*, 2003 ; Baron *et al.*, 2005 ; Sultan *et al.*, 2005) qui a été développé spécifiquement pour simuler la réponse des céréales sèches (sorgho, mil) aux variations climatiques en milieu semi-aride (calibré et appliqué principalement au Sahel).

Simuler les règles de décisions des exploitants

En se basant sur les effets attendus des changements de pratiques et des variations climatiques, le modèle d'exploitation doit être capable d'estimer la meilleure stratégie culturale en réponse à la prévision climatique. Sultan *et al.* (2010) identifient cette stratégie optimale en réalisant une optimisation au sein d'un grand ensemble de stratégies possibles en maximisant le revenu net des paysans tout en respectant un certain nombre de contraintes. Parmi ces contraintes figurent la disponibilité en terre et en temps de travail, les contraintes de rotation des cultures, l'autosuffisance alimentaire de l'exploitation ainsi qu'un revenu minimum en cas d'année sèche. Roudier *et al.* (2011b) réalisent le même type d'optimisation au sein d'un ensemble de stratégies possibles mais introduisent explicitement l'aversion au risque dans les règles de décision des agriculteurs.

En effet, selon le point de vue des paysans, la meilleure stratégie n'est pas celle qui vise à maximiser leur revenu moyen mais celle qui assure un revenu moyen élevé tout en minimisant le risque d'être dans une situation critique à cause de mauvaises récoltes (Brüntrup, 2000 ; de Rouw, 2003). L'indicateur retenu par Roudier *et al.* (2011) est le « revenu équivalent certain », c'est-à-dire le revenu certain qui apporte aux agriculteurs la même utilité que la distribution aléatoire de revenus considérée. Ils simulent donc cette aversion au risque (voir Ogurtsov *et al.*, 2008 pour une revue) en faisant l'hypothèse que les agriculteurs maximisent leur utilité via une fonction CRRA (*Constant Relative Risk Aversion*) qui a été employée pour des cas similaires dans la littérature scientifique (Holt et Laury, 2002 ; Letson *et al.*, 2009, par exemple). Chavas et Holt (1996) tout comme Pope et Just (1991) affirment de plus que cette fonction est particulièrement appropriée pour décrire le comportement des agriculteurs.

Quantification des bénéfices de la prévision saisonnière

Validation des modèles d'exploitation

Un préalable à l'utilisation du modèle d'exploitation pour l'évaluation de nouvelles stratégies est la validation de la capacité de ce modèle à bien représenter la stratégie actuelle de l'exploitation. Cette validation est réalisée par une simulation de contrôle sur un ensemble d'années existantes. On vérifie alors que les sorties du modèle d'exploitation en termes de stratégie d'exploitation (allocation des terres, utilisation de fertilisants par exemple) sont proches de ce que l'on observe dans l'exploitation que l'on modélise. La figure 2 montre la capacité du modèle d'exploitation développé par Roudier *et al.* (2011b) à représenter la répartition des différentes variétés de mil et l'utilisation de fertilisants dans le Sud-Ouest du Niger. La simulation de contrôle (figure 2) est définie premièrement par une forte prédominance de la variété à cycle court HK (~82 %) par rapport à la variété à cycle long Somno (~18 %). De plus, les engrais chimiques ne sont pas employés du tout : ils peuvent en effet être inutiles lors de certaines années et sont relativement chers, leur utilisation serait donc risquée. Ces constatations sont proches des observations faites dans cette région. Les barres grisées

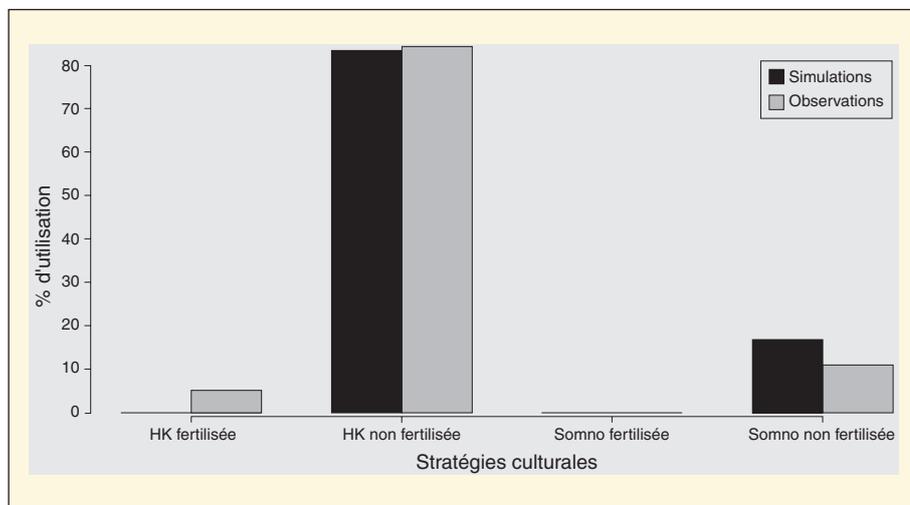


Figure 2. Comparaison des taux d'utilisation de chaque itinéraire culturel selon la simulation de contrôle du modèle d'exploitation et selon les données observées au Niger sur la période 2004-2007.

Source : d'après Roudier *et al.* (2011b).

représentent les résultats des essais agronomiques *in situ*, sur les dix localités concernées (2004-2007). Selon ces données, la variété HK est également préférée au cycle plus long de Somno (13 %). Bezançon *et al.* (2009) aboutissent à des résultats similaires sur la même zone et avec des données observées *in situ*. De plus, le taux observé d'utilisation des fertilisants est proche de celui qui est issu de la simulation, même s'il est légèrement plus élevé que pour le scénario de contrôle (5 % vs 0 %).

Évaluation économique des systèmes de prévision saisonnière existants

Contrairement aux prévisions météorologiques à courte ou moyenne échéance, les prévisions saisonnières sont des prévisions probabilistes du climat dont la source essentielle de prévisibilité est contenue dans l'anomalie initiale de températures de surface de la mer et dans son évolution au cours de la saison. Elles peuvent être obtenues à partir de modèles du climat mondial (*Global Climate Models – GCMs*) réalisant un ensemble de plusieurs simulations couplées avec différents états initiaux de l'atmosphère et de l'océan sur une période de quelques mois. Pour les besoins de l'évaluation, des ensembles de ces prévisions numériques ont été réalisés sur de longues périodes d'années passées (*hindcasts*) au sein de plusieurs projets européens d'envergure (DEMETER : Palmer *et al.*, 2004 ; ENSEMBLES : Batté et Déqué, 2010).

Ils sont libres d'accès et ont été utilisés par Sultan *et al.* (2010) et Roudier *et al.* (2011b) pour évaluer leur intérêt économique pour les agriculteurs en Afrique de l'Ouest. Parmi les autres systèmes existants, les prévisions du forum PRESAO auquel collaborent les agences météorologiques nationales et les groupes de prévisionnistes européens sont certainement les plus diffusées dans la région. Ce forum donne chaque printemps une prévision de la saison des pluies à venir, en utilisant différentes sources d'informations comme des GCM et des modèles nationaux fondés sur des approches statistiques (Konte, 2007). Les agences météorologiques nationales diffusent alors l'information à travers l'Afrique de l'Ouest, notamment sous forme de carte donnant avant le début de la saison pluvieuse à venir une information sur la probabilité que le cumul pluviométrique estival soit supérieur, égal ou inférieur à la normale (*figure 3*). Si cette prévision présente un intérêt certain pour les agriculteurs, leur permettant d'orienter leur stratégie en fonction de la prévision de la saison à venir, son imprécision en termes d'échelle ou en raison de sa nature probabiliste mais aussi ses erreurs peuvent amener l'agriculteur à prendre de mauvaises décisions au sein de son exploitation.

Les modèles d'exploitation peuvent être utilisés pour évaluer de manière *ex ante* les bénéfices mais aussi les risques pour les agriculteurs liés à l'utilisation des prévisions saisonnières existantes. Sultan *et al.* (2010) ont utilisé le modèle d'exploitation pour simuler les choix stratégiques optimaux (choix entre plu-

sieurs variétés, entre plusieurs niveaux de fertilisation, choix d'allocation des terres cultivables au sein de l'exploitation) selon que les paysans ne possèdent aucune indication sur la saison des pluies à venir (simulation de contrôle) ou qu'ils reçoivent la prévision saisonnière. Le revenu net de l'exploitation pour ces différentes stratégies est alors calculé et le bénéfice de l'utilisation de la prévision saisonnière peut être estimé en faisant la différence entre le revenu simulé en utilisant la prévision saisonnière et celui qui est issu de la simulation de contrôle. Ils calculent alors la valeur de la prévision de chaque modalité d'une prévision catégorielle du cumul saisonnier. Les trois catégories retenues sont basées sur les terciles (année sèche, normale et humide) pour reproduire le format de la prévision opérationnelle PRESAO. Du *tableau 2*, on déduit que la prévision des années sèches a plus de valeur économique que celle des années humides. En effet, elle permet à l'exploitation de réaliser un bénéfice de près de 80 % par rapport au revenu sans l'utilisation de la prévision saisonnière et l'impact de l'erreur de la prévision est faible si l'année s'avère en réalité normale (une perte de - 9,4 % de revenu) et reste limitée si l'année est en réalité humide (- 27,7 %). La stratégie optimale en cas d'année humide est très risquée pour les paysans (notamment une forte proportion de maïs dédié à la vente, à forte valeur économique mais très sensible à la contrainte hydrique). Aussi, le coût économique d'une prévision erronée est tel (jusqu'à une perte de 70 % des revenus) que son intérêt est limité. Cette méthodologie a ensuite été utilisée pour évaluer la valeur économique des systèmes de prévisions existants sur l'Afrique de l'Ouest. Qu'elles soient issues de schémas statistiques ou de modèles climatiques, les prévisions saisonnières que l'on a évaluées présentent des scores de prédiction et des valeurs économiques similaires sur la période de référence considérée (1970-2000). Les deux types de méthodes statistiques et dynamiques aboutissent à une augmentation des revenus de respectivement 13,8 et 9,6 % lorsque l'on considère uniquement la prévision des années sèches qui semblent seules avoir un intérêt économique pour l'exploitation que l'on a modélisée (Sultan *et al.*, 2010).

Dans une exploitation aux conditions climatiques plus sèches au Niger, Roudier *et al.* (2011b) montrent également un bénéfice de la prévision catégorielle de type PRESAO sur les revenus des paysans avec un impact

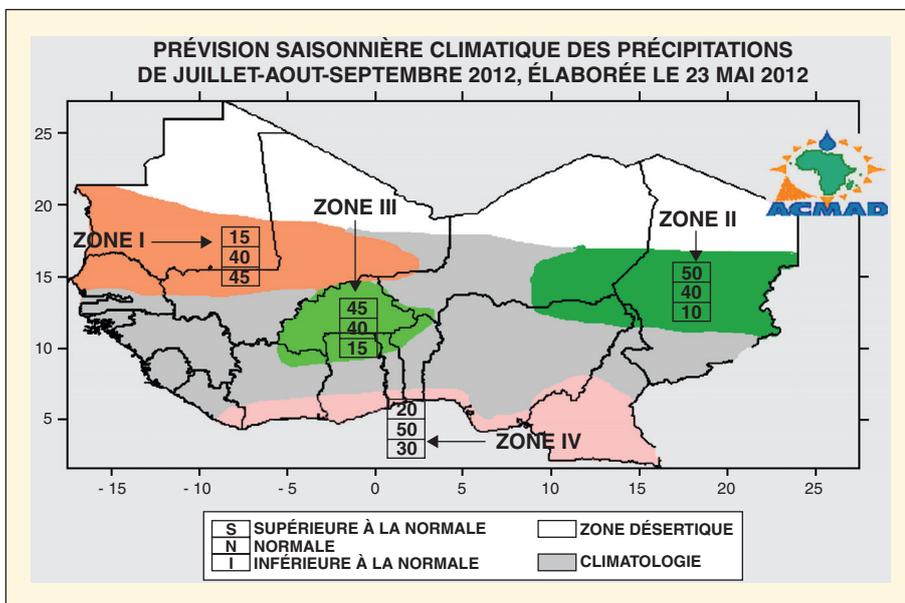


Figure 3. Carte des prévisions saisonnières en Afrique de l’Ouest issue du forum PRESAO 2012.

Elle représente les différentes zones et les probabilités pour que le cumul des pluies de l’été 2012 (de juillet à septembre) soit supérieur (rectangle du haut), égal (rectangle du milieu) et inférieur (rectangle du bas) à la normale climatologique.

Source : ACMAD, 23 mai 2012.

positif sur le revenu équivalent certain de + 6,9 % (figure 4). Cependant, contrairement aux résultats obtenus par Sultan *et al.* (2010) au Sénégal, le bénéfice espéré est le plus fort pour les années humides (+ 12,1 %) que pour les années sèches (+ 7,1 %). Les différences d’augmentation entre les années sèches et humides sont dues aux stratégies culturales : en année humide, celles-ci diffèrent beaucoup plus de la situation de contrôle qu’en année sèche. Les saisons humides, souvent plus longues, permettent notamment l’utilisa-

tion de la variété à cycle plus long (Somno) et des fertilisants qui améliorent leurs rendements. Ces ajustements ne sont pas possibles ou sont moins efficaces en année sèche, car pour l’essentiel, en l’absence de prévisions, les agriculteurs choisissent une stratégie culturale proche de celle qui s’avère optimale en saison sèche, du fait de leur aversion pour le risque. Ces résultats sont globalement cohérents avec ceux de Patt *et al.* (2005), calculés dans le cadre d’une étude *ex post* pour deux années, au Zimbabwe. Cette étude indique que

Tableau 2. Valeur des prévisions saisonnières (en % par rapport au revenu net obtenu sans utiliser la prévision saisonnière).

	Prévisions		
	Année sèche (%)	Année normale (%)	Année humide (%)
<i>Observation</i>			
Année sèche	+ 79,7	0	- 70,1
Année normale	- 9,4	0	- 10,8
Année humide	- 27,7	0	+ 6,5

La valeur de la prévision d’une année sèche varie de + 79,7 % selon que l’année s’avère vraiment sèche (prévision parfaite) à - 9,4 et - 27,7 % selon que l’année observée est respectivement normale ou humide (la prévision est fausse). La valeur de la prévision d’une année humide varie de + 6,5 % selon que l’année s’avère vraiment humide (prévision parfaite) à - 10,8 et - 70,1 % selon que l’année observée est respectivement normale ou sèche (la prévision est fausse). La prévision d’une année normale n’a pas de valeur.

Source : d’après Sultan *et al.* (2010).

l’utilisation de prévisions a entraîné sur les deux années une augmentation de 9,4 % dans les récoltes. Elle souligne également que l’augmentation est meilleure durant les années humides (+ 18,7 %).

Quelles améliorations sont-elles nécessaires dans les systèmes de prévisions ?

L’avantage des approches *ex ante* est qu’elles sont capables d’évaluer l’impact de progrès sur les systèmes de prévisions existants, que ce soit par l’amélioration du score de la prévision ou bien par l’introduction de nouveaux produits de prévisions en réponse aux besoins des utilisateurs. Pour estimer quel est le niveau minimal de qualité de la prévision saisonnière pouvant apporter des bénéfices aux agriculteurs, Sultan *et al.* (2010) ont généré 10 000 prévisions virtuelles de la saison humide au Sénégal (de juillet à septembre) où l’incertitude des prévisions est modélisée en ajoutant un bruit blanc normé à la série observée de pluies au Sénégal. Ils montrent qu’à partir d’une valeur de corrélation de $R = 0,5$ environ sur une période de 31 ans, l’utilisation des prévisions saisonnières est toujours bénéfique pour les agriculteurs (figure 5). Ils montrent également que les bénéfices augmentent exponentiellement avec l’augmentation linéaire du score de la prévision saisonnière (figure 5). Roudier *et al.* (2011b) se sont également intéressés à la façon dont le progrès de la prévision climatique peut se traduire en termes de bénéfices pour les agriculteurs au Niger. Ils ont considéré trois types de prévisions : la prévision catégorielle imparfaite du cumul saisonnier (typiquement celle qui est issue du système actuel PRESAO), la prévision catégorielle parfaite du cumul saisonnier (typiquement si on améliore fortement le système PRESAO sans changer les variables qu’il prévoit), et la prévision catégorielle parfaite du cumul saisonnier avec en plus la prévision du début et de la fin de la saison des pluies (typiquement si l’on complète le système PRESAO avec de nouvelles variables prévues). Il est intéressant de constater que l’augmentation la plus forte du bénéfice de la prévision ne se réalise pas avec l’amélioration du score du système existant (le passage de la prévision imparfaite à parfaite n’entraîne qu’une augmentation limitée du bénéfice espéré dans la figure 4) mais plutôt grâce à l’introduction de la prévision des variables supplémentaires

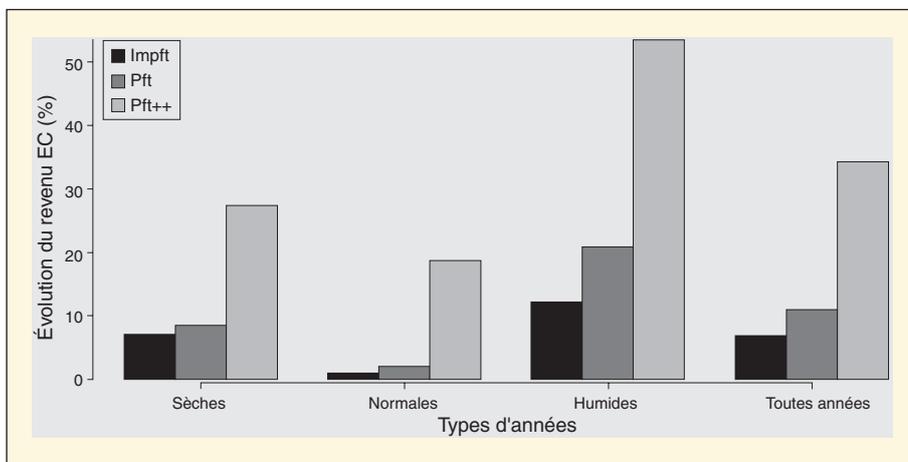


Figure 4. Évolution du revenu équivalent certain (en %) par rapport à la situation de contrôle, selon le type d'années et le type de système de prévisions considérés.

Les trois systèmes de prévisions considérés sont : (Impft) une prévision imparfaite du cumul pluviométrique saisonnier proche du système PRESAO actuel ; (Pft) une prévision parfaite du cumul saisonnier ; et (Pft++) une prévision parfaite du cumul saisonnier, du démarrage et de la fin de la saison des pluies.

Source : d'après Roudier *et al.* (2011b).

que constituent le démarrage et la fin de la saison des pluies. Le bénéfice en termes d'augmentation du revenu équivalent certain pour les agriculteurs

atteint alors + 53,5 % en années humides, + 27,5 % en années sèches et + 18,5 % en années à pluviométrie normale (figure 4). Ce résultat confirme

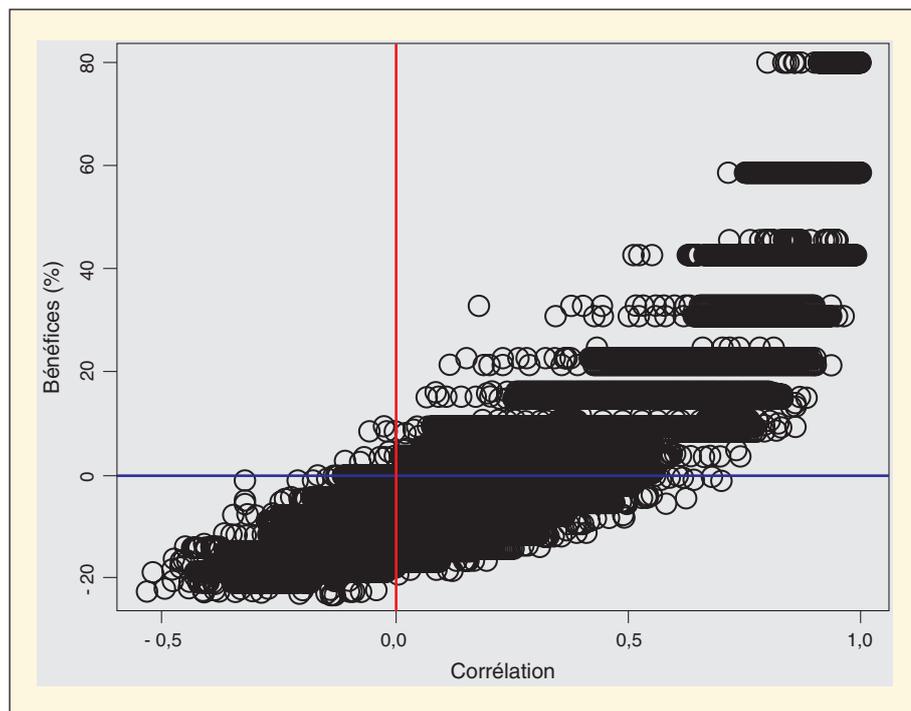


Figure 5. Relations entre la valeur de l'utilisation des prévisions des années sèches (en % d'augmentation du revenu pour l'exploitation) et la qualité de la prévision mesurée par la corrélation entre la prévision et l'observation sur une période de 31 ans.

Les résultats sont basés sur la génération de 10 000 prévisions virtuelles de la saison humide au Sénégal (de juillet à septembre) où l'incertitude des prévisions est modélisée en ajoutant un bruit blanc normé à la série observée de pluies au Sénégal. La barre verticale rouge représente la corrélation $R = 0$ et la barre horizontale bleue la valeur zéro où les prévisions ont une valeur nulle pour les agriculteurs.

Source : d'après Sultan *et al.* (2010).

l'importance de la prévision de la date de démarrage des pluies pour l'agriculture déjà montrée dans des travaux antérieurs (Sultan *et al.*, 2005 ; Marteau *et al.*, 2011) et qui a été soulignée très justement par les agriculteurs sahéliens comme la priorité en termes d'indicateurs climatiques à inclure dans les systèmes de prévisions (Ingram *et al.*, 2002).

Discussion et conclusion

Bien que portant sur des exploitations agricoles africaines où les conditions climatiques et socio-économiques sont différentes, les travaux de Sultan *et al.* (2010) et Roudier *et al.* (2011b) ont montré que les agriculteurs peuvent tirer un bénéfice en termes d'augmentation de revenu et de réduction du risque grâce à l'utilisation de la prévision saisonnière en dépit de son incertitude et de son imperfection. Ce bénéfice diffère néanmoins selon le type d'années et le type d'exploitations considérées. Il est plus important en cas d'année sèche au Sénégal où la prévision évite d'investir sur des cultures trop risquées comme le maïs. À l'inverse, il est plus important en cas d'année humide au Niger où les agriculteurs peuvent profiter de la bonne saison anticipée en adoptant des variétés plus longues et en ajoutant des fertilisants qui ne sont efficaces qu'en cas de bonnes années. Les différences entre ces deux études soulignent la difficulté de généraliser les résultats sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest et le besoin de répéter ce type d'exercice en prenant soin de varier les conditions environnementales et socio-économiques des exploitations africaines. C'est un des objectifs du projet ESCAPE (<http://www.locean-ipsl.upmc.fr/ESCAPE>) qui poursuivra ces analyses coût-bénéfice pour d'autres exploitations en Afrique de l'Ouest.

Si le système actuel de prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest semble pouvoir apporter des bénéfices aux agriculteurs, Roudier *et al.* (2011b) ont néanmoins montré qu'il a ses limites. En effet, un des défauts majeurs de ce système est qu'il ne répond pas aux attentes des utilisateurs quant aux variables climatiques les plus pertinentes pour l'aide à la décision. Les travaux de Roudier *et al.* (2011b) mais aussi ceux d'Ingram *et al.* (2002) sur les besoins des agriculteurs au Sahel en termes d'information et de prévision climatique ont permis de mettre en évidence que les

variables les plus pertinentes pour la stratégie agricole sont le démarrage et la fin de la saison des pluies ainsi que la distribution des pluies à l'intérieur de la saison de mousson (distribution intra-saisonnière). En effet, le choix de la date de semis est un élément crucial dans la stratégie de l'agriculteur qui doit s'assurer que le semis n'est pas suivi d'une trop longue séquence sèche et que la plante arrive à maturation à la fin de la saison des pluies. De plus, l'occurrence de séquences sèches pendant les phases critiques de développement de la plante peut avoir des répercussions importantes sur le rendement, et ce, même si le cumul saisonnier (total pluviométrique accumulé sur la saison de mousson) est important. Cependant, les forums de prévisions saisonnières ne mettent l'accent que sur le cumul saisonnier qui ne correspond pas à une attente prioritaire pour les agriculteurs. L'amélioration de ces prévisions et des bénéfices potentiels des utilisateurs devra donc passer par l'intégration de la prévision de ces variables. Enfin, les études de Sultan *et al.* (2010) et de Roudier *et al.* (2011b) ne traitent pas d'un point extrêmement important concernant l'utilisation de la prévision saisonnière pour l'aide à la décision qui est celui de sa diffusion auprès des agriculteurs et de son adoption au sein des pratiques locales. Les moyens de communication de la prévision, son interprétation par les agriculteurs et son intégration parmi les différentes stratégies locales d'adaptation aux aléas climatiques sont pourtant des enjeux cruciaux pour espérer tirer des bénéfices des prévisions saisonnières. Ils nécessitent de mettre en place un dialogue entre les producteurs d'information climatique et les utilisateurs comme celui qu'a amorcé par exemple l'Agence nationale de l'aviation civile et de la météorologie du Sénégal (ANACIM) où les prévisionnistes font des séminaires itinérants dans les exploitations agricoles au Sénégal pour non seulement informer les agriculteurs sur les possibilités des prévisions mais aussi pour entendre les agriculteurs s'exprimer sur leurs besoins et leurs stratégies agricoles. D'autres exemples de ce type sont en cours dans le cadre des projets CCAFS et ESCAPE avec la mise en place d'ateliers participatifs où les producteurs sont à même de s'exprimer sur ces innovations telles que la prévision climatique (Roudier, 2012). Faire participer les acteurs dans ce processus de transfert de connaissances scientifiques vers les acteurs est très certainement un prérequis pour l'adop-

tion de ces mesures *in fine* pour l'aide à la décision. ■

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce aux financements du Réseau de recherche sur le développement soutenable de la Région Ile-de-France (R2DS), du programme AMMA et du support de l'Agence nationale de la recherche (ANR) à travers le projet ESCAPE (ANR-10-CEPL-005 ; <http://www.icean-ipsl.upmc.fr/~ESCAPE>). Les auteurs remercient C. Baron, A. Alhassane, S.B. Traoré, B. Muller, B. Barbier, J. Fortilus, S.M. Mbaye et G. Leclerc pour leur contribution aux analyses agronomiques et économiques au Niger et au Sénégal.

Références

Affholder F, 1997. Empirically modeling the interaction between intensification and climatic risk in semi-arid regions. *Field Crops Research* 52 : 79-93.

Baron C, Sultan B, Balme M, Sarr B, Lebel T, Janicot S, *et al.*, 2005. From GCM grid cell to agricultural plot : scale issues affecting modelling of climate impact. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 360 : 2095-108.

Batté L, Déqué M, 2010. Seasonal predictions of precipitation over Africa using coupled ocean-atmosphere general circulation models : skill of the ENSEMBLES project multi-model ensemble forecasts. *Tellus A* 63 : 283-99.

Bezançon G, Pham JL, Deu M, Vigouroux Y, Sagnard F, Mariac C, *et al.*, 2009. Changes in the diversity and geographic distribution of cultivated millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) and sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) varieties in Niger between 1976 and 2003. *Genetic Resources and Crop Evolution* 56 : 223-36.

Boote K, Jones J, Hoogenboom G, 1998. *Simulation of crop growth : CROPGRO model*. New York : éditions Marcel Dekker.

Brisson N, Ruget F, Gate P, Lorgeou J, Nicoullaud B, Tayot X, *et al.*, 2002. STICS : a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22 : 69-92.

Brüntrup M, 2000. The level of risk aversion among African farmers – results of a gambling approach. *Deutscher Tropentag 2000* in Hohenheim, Hohenheim.

CGIAR, Consultative Group on International Agricultural Research, 2009. *Climate, agriculture and food security : A strategy for change*. S.I.: Alliance of the CGIAR Centers.

Chavas J, Holt M, 1996. Economic behaviour under uncertainty : a joint analysis of risk preferences and technology. *Review of Economics and Statistics* 78 : 329-35.

Christensen JH, Hewitson B, Busuoiuc A, Chen A, Gao X, Held I, *et al.*, 2007. Regional Climate Projections. In : Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL, eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge (UK) ; New York (USA) : Cambridge University Press.

de Rouw A, 2003. Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. *Agricultural Systems* 81 : 73-93.

Diepen C, Wolf J, Keulen H, Rappoldt C, 1989. WOFOST : a simulation model of crop production. *Soil Use and Management* 5 : 16-24.

Dingkuhn M, Baron C, Bonnal V, Maraun F, Sarr B, Sultan B, *et al.*, 2003. Decision-support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. In : Struij-Bontjes TE, Wopereis MCS, eds. *A practical guide to decision-support tools for agricultural productivity and soil fertility enhancement in sub-Saharan Africa*. Muscle Shoals (Alabama, USA) : IFDC ; CTA.

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

Hamatan M, Mahé G, Servat E, Paturel JE, Amani A, 2004. Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest. *Sécheresse* 15 : 279-86.

Hansen JW, 2002. Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture : issues, approaches, challenges. *Agricultural Systems* 74 : 309-30.

Hassan R, Nhemachena C, 2008. Determinants of african farmers' strategies for adapting to climate change : Multinomial choice analysis. *AfJARE* 2 : 83-104.

Holt CA, Laury SK, 2002. Risk Aversion and Incentive Effects. *American Economic Review* 92 : 1644-55.

Pison G, 2011. Tous les pays du monde. *Population & Sociétés* 480 : 1-8.

Ingram KT, Roncoli MC, Kirshen PH, 2002. Opportunities and constraints for farmers of West Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agricultural Systems* 74 : 331-49.

Keating B, Carberry P, Hammer G, Probert M, Robertson M, Holzworth D, *et al.*, 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18 : 267-88.

Knox J, Hess T, Daccache A, Wheeler T, 2012. Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia. *Environmental Research Letters* 7. doi: 10.1088/1748-9326/7/3/034032. 034032, 8 p.

Konte O, 2007. Méthodologie d'analyse de la performance et d'interprétation des prévisions saisonnières des précipitations (PRESAO) : application à la culture du mil au Sénégal. *Centre régional Aghrymet* 49.

- Letson D, Laciara CE, Bert FE, Weber EU, Katz RW, Gonzalez XI, *et al.*, 2009. Value of perfect ENSO phase predictions for agriculture : evaluating the impact of land tenure and decision objectives. *Climatic Change* 97 : 145-70.
- Lobell DB, Burke MB, Tebaldi C, Mastrandrea MD, Falcon WP, Naylor RL, 2008. Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science* 319 : 607-10.
- Luseno WK, McPeak JG, Barrett CB, Little PD, Gebru G, 2003. Assessing the Value of Climate Forecast Information for Pastoralists : Evidence from Southern Ethiopia and Northern Kenya. *World Development* 31 : 1477-94.
- Meza FJ, Hansen JW, Osgood D, 2008. Economic Value of Seasonal Climate Forecasts for Agriculture : Review of Ex-Ante Assessments and Recommendations for Future Research. *Journal of Applied Meteorology* 47 : 1269-86.
- Müller C, 2011. Agriculture : Harvesting from uncertainties. *Nature Climate Change* 1 : 253-4.
- O'Brien K, Sygna L, Næss LO, Kingamkono R, Hochobeb B, 2000. *Is information enough? User responses to seasonal climate forecasts in Southern Africa*. Report 2000: 03. Oslo (Norway) : CICERO.
- Ogallo LA, Boulahya MS, Keane T, 2000. Applications of seasonal to interannual climate prediction in agricultural planning and operations. *Agricultural and Forest Meteorology* 103 : 159-66.
- Ogurtsov VA, Van Asseldonk MPAM, Huirne RBM, 2008. Assessing and modelling catastrophic risk perceptions and attitudes in agriculture : a review. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 56 : 39-58.
- Palmer TN, Alessandri A, Andersen U, Cante-laube P, Davey M, Délecluse P, *et al.*, 2004. Development of a European multi-model ensemble system for seasonal to inter-annual prediction (DEMETER). *Bulletin of the American Meteorological Society* 85 : 853-72.
- Patt A, Suarez P, Gwata C, 2005. Effects of seasonal climate forecasts and participatory workshops among subsistence farmers in Zimbabwe. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102 : 12623-8.
- Pope R, Just R, 1991. On testing the structure of risk preferences in agricultural supply system. *American Journal of Agricultural Economics* 73 : 743-8.
- Ritchie J, Otter S, 1985. *Description and performance of CERES-Wheat a user-oriented wheat yield model*. Temple (Texas, USA) : USDA-ARS-SR Grassland Soil and Water Research Laboratory.
- Roncoli C, Jost C, Kirshen P, Sanon M, Ingram KT, Woodin M, *et al.*, 2009. From accessing to assessing forecasts : an end-to-end study of participatory climate forecast dissemination in Burkina Faso (West Africa). *Climatic Change* 92 : 433-60.
- Roudier P, 2012. *Climat et agriculture en Afrique de l'Ouest : Quantification de l'impact du changement climatique sur les rendements et évaluation de l'utilité des prévisions saisonnières*. Paris, France : EHESS. Thèse de doctorat.
- Roudier P, Sultan B, Quirion P, Berg A, 2011a. The impact of future climate change on West African crop yields : What does the recent literature say? *Global Environ Change* 21 : 1073-83.
- Roudier P, Sultan B, Quirion P, Baron C, Alhassane A, Traoré S, *et al.*, 2011b. An ex-ante evaluation of seasonal forecasting for millet growers in SW Niger. *International Journal of Climatology* 32 : 759-71. doi: 10.1002/joc.2308.
- Schlenker W, Lobell DB, 2010. Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters* 5 : 1-8.
- Sultan B, Barbier B, Fortilus J, Mbaye SM, Leclerc G, 2010. Estimating the potential economic value of the seasonal forecasts in West Africa : a long-term ex-ante assessment in Senegal. *Weather Climate and Society* 2 : 69-87.
- Sultan B, Baron C, Dingkuhn M, Saar B, Janicot S, 2005. Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology* 128 : 93-110.
- Tarhule A, Lamb PJ, 2003. Climate research and seasonal forecasting for West Africans - Perceptions, dissemination, and use? *Bulletin of the American Meteorological Society* 84 : 1741-59.
- Van der Linden P, Mitchell JFB, 2009. *ENSEMBLES : Climate Change and its Impacts : Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project*. Exeter (UK) : Met Office Hadley Centre.
- Ward MN, 1998. Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical north Africa at interannual and multidecadal timescales. *Journal of Climate* 11 : 3167-91.
- Ward N, Cook K, Diedhiou A, Fontaine B, Giannini A, Kamga A, 2004. Seasonal-to-Decadal Predictability and Prediction of West African Climate. *CLIVAR Exchanges* 9 : 14-20.
- Wilks DS, 1997. Forecast value : Prescriptive decision studies. In : Katz R, Murphy A, eds. *Economic Value of Weather and Climate Forecasts*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Williams JR, Jones CA, Dyke PT, 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transamerican Society of Agricultural Engineering* 27 : 129-44.
- Ziervogel G, Bithell M, Washington R, Downing T, 2005. Agent-based social simulation : a method for assessing the impact of seasonal climate forecast applications among smallholder farmers. *Agricultural Systems* 83 : 1-26.