



L'essentiel de l'information
scientifique et médicale

www.jle.com

Le sommaire de ce numéro

http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro_biotech/sec/sommaire.md?type=text.html



Montrouge, le 28/03/2012

Amadou T. Gaye

Vous trouverez ci-après le tiré à part de votre article au format électronique (pdf) :
Représentation de la pluie dans les modèles régionaux de climat et application à l'estimation des rendements du mil au Sénégal

paru dans

Sécheresse, 2012, Volume 23, Numéro 1

John Libbey Eurotext

Ce tiré à part numérique vous est délivré pour votre propre usage et ne peut être transmis à des tiers qu'à des fins de recherches personnelles ou scientifiques. En aucun cas, il ne doit faire l'objet d'une distribution ou d'une utilisation promotionnelle, commerciale ou publicitaire.

Tous droits de reproduction, d'adaptation, de traduction et de diffusion réservés pour tous pays.

© John Libbey Eurotext, 2012

Représentation de la pluie dans les modèles régionaux de climat et application à l'estimation des rendements du mil au Sénégal

Seyni Salack^{1,2}
Benjamin Sultan³
Pascal Oettli⁴
Bertrand Muller^{5,6}
Amadou T. Gaye¹
Frédéric Hourdin⁷

¹ Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD)
Laboratoire de physique de l'atmosphère
et l'océan Siméon Fongang (LPAO-SF)
École doctorale Eau, qualité
et usage de l'Eau (EDEQUE)
BP 5085
Dakar-Fann
Dakar
Sénégal
<abutawakalt@gmail.com>
<atgaye@ucad.edu.sn>

² Centre d'étude régional pour l'amélioration
de l'adaptation à la sécheresse (CERAAS)
BP 3320
Thiès Escalé
Thiès
Sénégal

³ IRD
Laboratoire d'océanographie et climat :
expérimentations et analyses numériques
(LOCEAN)
Institut Pierre Simon Laplace
4, place Jussieu
Case 100
75252 Paris cedex 5
France
<Benjamin.sultan@locean-ipsl.upmc.fr>

⁴ University of Tokyo
Tokyo
Japan
<oettli@eps.s.u-tokyo.ac.jp>

Tirés à part : A. T. Gaye

Résumé

Les très fortes répercussions des aléas climatiques sur l'agriculture et la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne, auxquelles se rajoute la perspective du changement climatique, ont poussé la communauté scientifique à documenter les impacts du climat dans cette région. Cependant, si la plupart des études quantifiant les impacts du climat se basent sur des sorties de modèles régionaux de climat, très peu font part de l'incertitude associée à leur utilisation. Pourtant le choix d'un modèle régional plutôt qu'un autre, voire même d'une paramétrisation plutôt qu'une autre, peut influencer fortement sur le résultat final car les modèles agronomiques sont très sensibles à la qualité du forçage climatique en entrée. L'objectif de cette étude est d'explorer cette question en analysant la dispersion de la représentation des pluies issues d'un ensemble de huit modèles régionaux et la façon dont cette dispersion se traduit dans l'estimation des rendements du mil au Sénégal, simulés par le modèle agronomique SARRAH. L'étude montre qu'il existe une grande dispersion dans la représentation de la pluviométrie d'un modèle régional à l'autre (et même pour un même modèle régional avec deux jeux de paramètres différents) tant à l'échelle saisonnière qu'à l'échelle intrasaisonnière. Ces biais introduisent des erreurs importantes dans l'estimation des impacts agronomiques. Ces erreurs peuvent être à même d'invalider des conclusions sur les impacts du changement climatique basés sur l'utilisation d'un seul modèle régional. L'utilisation de méthodes de correction de biais s'avère ainsi indispensable.

Mots clés : impact local, modèle climatique régional, modèle de culture, Sahel, Sénégal, simulation d'ensemble.

Abstract

Representation of rainfall in regional climate models and application to millet yield estimations in Senegal

The strong influence of climatic factors on agriculture and food security in sub-Saharan Africa in addition to climate change perspectives have prompted the scientific community to document the impacts of climate in this region. However, if many studies quantifying the impacts of climate rely on downscaling, very few address the uncertainty associated with their use. However, the choice of a particular method and

Pour citer cet article : Salack S, Sultan B, Oettli P, Muller B, Gaye AT, Hourdin F, 2012. Représentation de la pluie dans les modèles régionaux de climat et application à l'estimation des rendements du mil au Sénégal. *Sécheresse* 23 : 14-23. doi : 10.1684/sec.2012.0332

⁵ Cirad
UMR AGAP
F-34398 Montpellier
France
<Bertrand.muller@cirad.fr>

⁶ Africa Rice Center
AfricaRice
Sahel Regional Station
BP 96
Saint-Louis
Sénégal

⁷ CNRS
Laboratoire de météorologie dynamique
(LMD)
Institut Pierre Simon Laplace
Ecole Polytechnique
Aile 5 - LMD
Route de Saclay
91128 Palaiseau cedex
France
<Frederic.Hourdin@lmd.jussieu.fr>

of a particular regional model can strongly influence the final result since crop models are very sensitive to the quality of the input climate forcing. The objective of this study is to address this issue by analysing the dispersion of rainfall provided by eight regional models and how this dispersion spreads in the estimation of millet yields in Senegal. The SARRAH crop model is used to simulate millet yields. The study shows that there is a wide dispersion in the representation of rainfall from one regional model to another (and even sometimes for the same regional model with two sets of parameters) at both the seasonal and intra-seasonal scales. These biases introduce significant errors in estimating the agronomic impacts, which might invalidate conclusions about the impacts of climate change based on the use of a single regional model. The use of a bias correction method is indispensable.

Key words: crop model, ensemble-based simulation, local impact, regional climate model, Sahel, Senegal.

Les très fortes répercussions des aléas climatiques sur l'agriculture et la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne auxquelles s'ajoute la perspective du changement global ont poussé la communauté scientifique à orienter ses efforts vers le couplage entre le climat et l'agriculture de manière à ce que les progrès en termes de compréhension et de prévision de la variabilité et des changements de la mousson en Afrique puissent être bénéfiques pour les sociétés (Sultan *et al.*, 2008). Cette approche doit tirer profit des progrès récents de chacune des deux disciplines : d'un côté, le développement continu, par les agronomes, de modèles de cultures mécanistes de plus en plus précis a permis d'analyser et de quantifier les effets des facteurs abiotiques (édaphiques, climatiques et chimiques) sur la croissance et la production des plantes (Berg *et al.*, 2010) ; de l'autre, des progrès importants ont été accomplis par la communauté des physiciens du climat dans le développement des modèles de circulation générale (MCG) pour prévoir le climat que ce soit pour la saison à venir ou bien pour le siècle prochain (van der Linden *et al.*, 2009). Bien que ces deux types d'outils aient été développés séparément, l'intérêt de coupler les modèles agronomiques aux modèles de climat apparaît de façon évidente : cela peut permettre, à l'échelle saisonnière, de prédire les rendements attendus des semaines voire des mois avant la récolte (Hansen *et al.*, 2006), et, à l'échelle pluri-décennale de réaliser des projections de la productivité agricole en réponse à l'évolution du climat afin de développer des stratégies d'adaptation appropriées (Berg *et al.*, 2010).

Cependant, ce couplage pose un certain nombre de problèmes méthodologiques notamment en raison du saut d'échelles entre les modèles agronomiques conçus pour appréhender des processus impliquant la plante, le sol et l'atmosphère à l'échelle de la parcelle et les MCG qui simulent le climat sur des mailles de plusieurs centaines de kilomètres de côté (Sultan *et al.*, 2008). De fait, comme beaucoup de modèles environnementaux ou de modèles d'impacts, les modèles de cultures sont spécifiques d'une échelle donnée, dans leur cas l'échelle parcellaire, et nécessitent des données d'entrée à cette échelle (Baron *et al.*, 2005 ; Heuvelink, 1998). Il apparaît donc inapproprié de forcer directement un modèle agronomique avec des sorties de MCG. Il est donc nécessaire de traduire les sorties des modèles globaux en une information locale utilisable par les modèles agronomiques à partir de l'information établie à plus grande échelle par les modèles de climat. Pour réaliser ce transfert d'échelle, on utilise des méthodes dites de descente d'échelle (ou « *downscaling* ») ; (Herrera *et al.*, 2006). Ces méthodes se répartissent en deux grandes catégories : i) les méthodes statistiques (Zorita et von Storch, 1999) ; et ii) les méthodes dynamiques (Paeth *et al.*, 2011) qui reposent sur des modèles de climat à aires limitées, appelés « modèle régional de climat » (MRC), simulant le climat local d'une région déterminée à résolution fine (20-50km). Ces méthodes dynamiques, sur lesquelles portera la présente étude, sont coûteuses en temps de calcul et reproduisent, voire amplifient, les biais des MCG mais elles peuvent s'avérer très pertinentes dans le

contexte du changement climatique puisque les modèles régionaux de climat (MRC) simulent toute la complexité du climat local (Sylla *et al.*, 2010a ; Jones *et al.*, 2004 ; Sylla *et al.*, 2010b). Les méthodes statistiques sont très simples à mettre en place, peu coûteuses en terme de temps, et peuvent également corriger efficacement les biais des MCG comme le montrent Ndiaye *et al.* (2011). En revanche, elles nécessitent d'avoir à disposition des jeux de données longs et fiables à l'échelle locale et font une hypothèse forte de stationnarité (les relations entre la grande échelle et l'échelle locale sont invariables dans le temps) qui peut être mise à défaut si le climat change. Cependant, si la plupart des études quantifiant les impacts du climat se basent sur des sorties de modèles régionaux de climat (MRC), très peu font part de l'incertitude associée à leur utilisation. Pourtant le choix d'un MRC plutôt qu'un autre, voire même d'une paramétrisation plutôt qu'une autre, peut influencer fortement sur le résultat final car les modèles agronomiques sont très sensibles à la qualité du forçage climatique en entrée. Ainsi Oetli *et al.* (2011) ont mis en évidence des biais importants dans les simulations de rendement utilisant les sorties de modèles régionaux. Ils ont montré que la mauvaise représentation de la pluie, mais également du bilan radiatif, important pour le bilan carboné et la production de biomasse, est à l'origine des contre-performances de la plupart des modèles régionaux. L'objectif de cette étude est d'aller plus avant dans le diagnostic des biais introduits par les modèles régionaux en faisant un bilan exhaustif de l'attribution

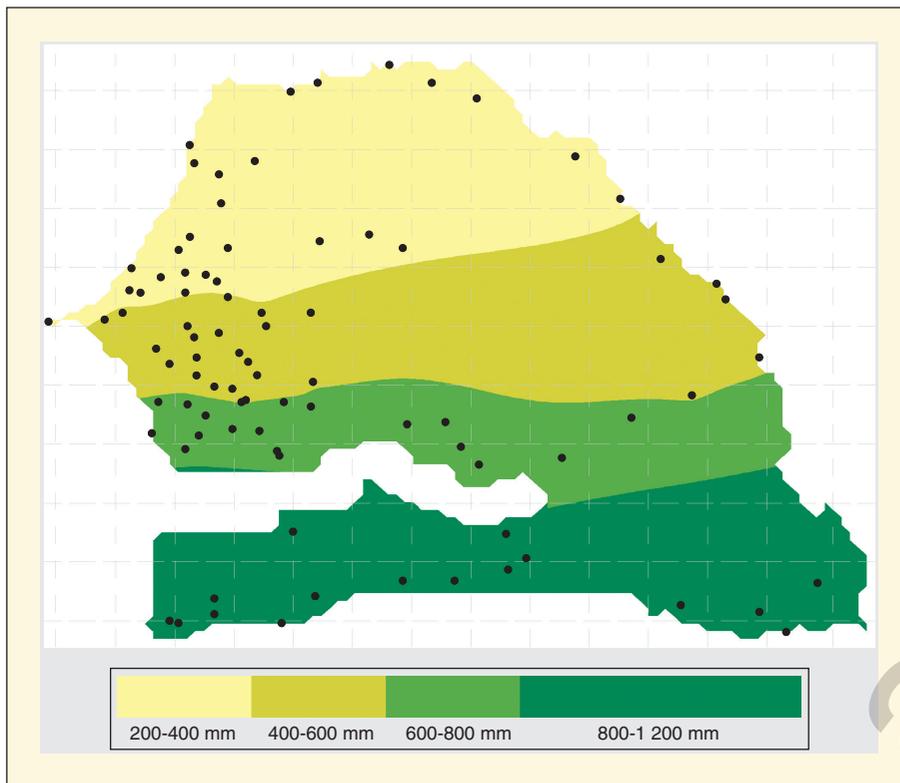


Figure 1. Mailles des modèles régionaux de climat (traits gris), réseau de stations d'observations ANAMS-CERAAS (points noirs) et zonage agroclimatique du Sénégal.

des erreurs pour la variable « pluie » des MRC. Nous analysons plus particulièrement la dispersion de la représentation des pluies issues d'un ensemble de huit modèles régionaux et la façon dont cette dispersion se traduit dans l'estimation des rendements du mil au Sénégal simulés par un modèle agronomique. On quantifiera les erreurs dans l'estimation des rendements liées aux erreurs sur les pluies simulées, et on décomposera et hiérarchisera les caractéristiques des pluies simulées à l'origine de ces erreurs. On évaluera uniquement les pluviométries issues des modèles tout en sachant que les autres variables simulées par les MRC, comme le rayonnement ou les températures, peuvent également présenter des biais importants qui pourraient engendrer des biais dans des simulations de modèles agronomiques Oetli *et al.* (2011).

Matériel et méthode

Les données climatiques observées et simulées

Les données de pluie observée du Sénégal sont extraites de la base de

données du Centre d'études régional pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse (CERAAS), qui est un centre de l'Institut sénégalais de recherches agricoles (Isra). Elles proviennent de divers réseaux d'observations dont celui de l'Agence nationale de la météorologie du Sénégal (ANAMS) (stations synoptiques, climatologiques et pluviométriques) et celui mis en place par l'Isra/CERAAS dans le cadre du suivi agro-sylvopastoral national. Ce sont des données journalières (1991-2007) dont les séries sont complètes et n'ont pas été interpolées (figure 1). Sur la base des cumuls annuels de ces données et des caractéristiques agroclimatiques rencontrés, quatre zones agroclimatiques sont considérées (Salack *et al.*, 2011) : la zone nord (NZ), située entre les isohyètes 200 et 400 mm ; la zone centre nord (CN), entre les isohyètes 400 et 600 mm ; la zone centre sud (CS), entre 600 et 800 mm ; et la zone pluviométrique sud (SZ) qui enregistre des cumuls annuels supérieurs à 800 mm en moyenne (figure 1). Malgré des différences de l'ordre de 200 mm/an, ces zones pluviométriques sont considérées ici comme des régions ayant une certaine homogénéité climatique vis-à-vis des cycles

saisonniers de pluie à l'échelle locale (Salack *et al.*, 2011).

Les données de précipitations journalières simulées sont issues des expériences de simulations de huit modèles régionaux (MRC) à fine résolution (0.44°x0.44°) forcés par les mêmes conditions latérales des réanalyses ERA-Interim (résolution spatiale de 0,75°x0,75°)¹. Elles couvrent l'Afrique de l'Ouest sur la période 1991-2007 à une résolution spatiale d'environ 50 km x 50 km (figure 1). Ces données, fruits d'une collaboration étroite entre les projets ENSEMBLES² (van der Linden, 2009) et AMMA (Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine) (Redelsperger, 2006), sont disponibles et accessibles à tous (<http://ensemblesrt3.dmi.dk/>). Ces modèles sont développés et/ou maintenus par différentes institutions. Parfois, deux institutions peuvent avoir le même modèle mais avec différentes configurations ou paramétrisations (tableau 1).

Toutes les analyses ont été faites en considérant et comparant, pour une station pluviométrique donnée, les pluviométries observées avec celles simulées par les MRC dans la maille dont le centre est le plus proche de la station. Il n'y a pas de moyenne ni d'interpolation de valeurs simulées venant de mailles voisines.

Les autres variables climatiques journalières nécessaires aux simulations agronomiques (températures, humidités, rayonnement, vent) ont été recueillies auprès de l'ANAMS pour 12 stations du Sénégal. Des moyennes interannuelles ont été calculées pour chaque station. Elles sont utilisées dans toutes les simulations. Ainsi seules les différences entre pluviométries peuvent avoir un impact sur les rendements dans nos analyses.

Le modèle SARRAH

SARRAH est un simulateur du développement et du rendement des cultures, développé par le Centre

¹ Les réanalyses ERA-Interim sont la nouvelle génération de réanalyse (1989 à nos jours) du Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme développées pour remplacer les réanalyses ERA-40 du même Centre (pour plus d'information voir <http://www.ecmwf.int>).

² Les expériences tirées du projet ENSEMBLES sont actuellement mise à profit dans le cadre de CORDEX (COordinated Regional Downscaling EXperiments), un projet global de désagrégation dynamique des scénarii de changements climatiques pour le prochain 5e rapport du Groupe intergouvernemental d'experts du climat (voir <http://wcrp.ipsl.jus-sieu.fr>).

Tableau 1. Noms et origines des huit modèles régionaux de climat (MRC) utilisés, et acronymes considérés pour l'étude.

Nom du modèle régional	Institution	Acronyme
HIRAM	Danish Meteorological Institute (DMI)	DMI
CLM	GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH (GKSS)	GKSS
HadRM3P	UK Met Office, Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HC)	HC
RegCM3	The Abdus Salam Intl. Centre for Theoretical Physics (ICTP)	ICTP
RACMO	The Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)	KNMI
HIRAM	Meteorologisk Institut	METNO
REMO	Max-Planck-Gesellschaft	MPI
RCA	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	SMHI

international de recherche agronomique pour le développement (Cirad), fonctionnant au pas de temps journalier, qui s'est révélé particulièrement bien adapté à l'étude des impacts du climat sur les céréales en milieu semi-aride (Sultan *et al.*, 2005 ; Baron *et al.*, 2005 ; Mishra *et al.*, 2008 ; Traoré *et al.*, 2011). Pour cette étude le modèle est calibré pour simuler une variété de mil appelée « *Souna III* » à cycle constant de l'ordre de 90 jours et à haut potentiel de rendement (Dingkuhn *et al.*, 2003 ; Sultan *et al.*, 2005). Cette variété a été développée au Sénégal après la sécheresse des années 1970 et est très largement vulgarisée dans l'ensemble du Sénégal.

Les forçages pluviométriques utilisés pour les simulations

Quatre forçages pluviométriques ont été construits de manière à être utilisés en entrées du modèle SARRAH.

1. Le forçage de référence basé sur les observations pluviométriques (*Ctrl*) : le modèle SARRAH est forcé avec les pluies journalières observées en station. C'est la simulation de référence.

2. Le forçage basé sur les pluies brutes des modèles régionaux (MRC_{orig}) : le modèle SARRAH est forcé avec la pluviométrie journalière issue des modèles régionaux. Pour ce faire, on extrait la valeur de la pluie du point de maille le plus proche de la station d'observation. Cette approche permet d'obtenir la pluie telle que simulée par les MRC sans l'interpoler. Il représente le scénario de forçage de la pluie originale de chaque MRC.

3. Le forçage basé sur la distribution des pluies des modèles régionaux (MRC_{dist}) : on calcule dans un premier

temps le biais relatif mensuel du cumul pluviométrique de chaque MRC de la façon suivante :

$$I_m = (y_m - o_m) / o_m$$

où I_m représente le biais d'un MRC pour le mois m , y_m le cumul pluviométrique du MRC pour le mois m et o_m le cumul pluviométrique observé. Ce biais relatif est calculé pour chaque année de la période 1991-2007 et chacune des 12 stations.

Ensuite ce biais relatif est utilisé pour redimensionner les valeurs journalières de pluie simulées par le MRC :

$$\hat{y}_{i,m} = y_{i,m} \times I_m$$

où $y_{i,m}$ représente la valeur de pluie du MRC au jour i et au mois m , et $\hat{y}_{i,m}$ la nouvelle valeur de pluie redimensionnée. Cette transformation n'affecte que les jours où la pluie est non nulle dans les MRC. Ainsi pour une année et une station considérée, le cumul des valeurs de $\hat{y}_{i,m}$ sur le mois m , notée \hat{y}_m , est identique à celui du cumul des pluies observée o_m . Néanmoins, la distribution intrasaisonnière des événements pluvieux dans chaque MRC reste inchangée. L'objectif de ce scénario de forçage est de conserver la fréquence d'occurrence des événements de pluies spécifiques à chaque MRC mais pas le cumul mensuel pluviométrique.

4. Le forçage basé sur les cumuls pluviométriques des modèles régionaux (MRC_{cum}) : On adopte la même méthode de perturbation que le scénario MRC_{dist} à la différence qu'elle s'applique aux pluies observées :

$$\hat{o}_{i,m} = o_{i,m} \times I_m$$

où $o_{i,m}$ représente la valeur de pluie observé au jour i et au mois m , et $\hat{o}_{i,m}$ la

nouvelle valeur de pluie redimensionnée. Cette transformation est réalisée pour chaque MRC et chaque station. Ainsi pour une année et une station considérée, le cumul des valeurs de $\hat{o}_{i,m}$ sur le mois m , notée \hat{o}_m , est identique à celui du cumul des pluies simulées y_m pour le MRC considéré. Néanmoins la distribution intrasaisonnière des événements pluvieux est celle des observations. L'objectif de ce scénario de forçage est de conserver le cumul mensuel des pluies spécifiques à chaque MRC mais pas la distribution intrasaisonnière.

De ce fait, les scénarii de forçage MRC_{dist} et MRC_{cum} sont des perturbations apportées à la pluie brutes issues des MRC (MRC_{orig}). Ils permettent de dissocier les biais des modèles en termes de cumul pluviométrique et de distribution intrasaisonnière. L'utilisation de ces forçages en entrée du modèle de culture SARRAH permet ainsi d'attribuer et de hiérarchiser l'erreur dans l'estimation des rendements agricoles liée à la représentation de ces deux caractéristiques de la pluviométrie dans les MRC en comparant les rendements simulés issus des simulations de contrôle (*Ctrl*) avec ceux issus des 3 forçages MRC_{orig} , MRC_{dist} et MRC_{cum} . La comparaison entre le jeu MRC_{orig} et la simulation de contrôle (*Ctrl*) permet de quantifier le biais total sur les rendements des modèles régionaux tandis que les comparaisons avec MRC_{dist} et MRC_{cum} permettent d'analyser les effets marginaux sur les rendements des biais affectant, respectivement, les distributions intrasaisonnières des pluies simulées et leurs cumuls.

Résultats

Les biais des modèles régionaux dans leur représentation de la pluie

Tous les modèles reproduisent le gradient latitudinal de pluviométrie mais ils ont du mal à retracer les limites exactes des zones pluviométriques, zone nord, centre nord, centre sud, zone sud (NZ, CN, CS, SZ) (tableau 2 et figure 2). Le modèle GKSS se démarque clairement avec des sous-estimations très importantes des pluviométries sur toutes les zones, allant jusqu'à - 63 % pour la zone nord. Le modèle DMI se distingue également car il est le seul à surestimer systématiquement les précipitations. Le modèle METNO surestime partout sauf dans la zone sud. Les autres modèles ont plutôt tendance à

Tableau 2. Évaluation des cumuls pluviométriques annuels simulée par les modèles régionaux de climat (MRC) sur la période 1991-2007.

Zone	Paramètre	Obs	DMI	GKSS	HC	ICTP	KNMI	METNO	MPI	SMHI	Moy.MRC
Nord (NZ)	Moy. (mm/an)	326	396	122	362	261	277	439	295	339	311
	Biais (%)		21	-63	11	-20	-15	35	-9	4	-5
	Cv (%)	25	26	58	25	31	25	26	29	29	31
Centre nord (CN)	Moy. (mm/an)	541	701	203	479	477	478	588	503	482	489
	Biais (%)		30	-62	-11	-11	-12	9	-7	-11	-9
	Cv (%)	27	22	44	25	20	19	21	23	26	25
Centre sud (CS)	Moy. (mm/an)	698	972	335	646	709	729	835	789	567	698
	Biais (%)		39	-52	-7	1	4	20	13	-19	0
	Cv (%)	20	17	34	18	14	16	18	17	28	20
Sud (SZ)	Moy. (mm/an)	1 111	1 222	544	796	868	916	957	1 120	649	884
	Biais (%)		10	-51	-28	-22	-17	-19	1	-41	-21
	Cv (%)	17	16	22	12	9	12	15	10	21	15
Sénégal	Moy. des biais (%)		25	-57	-9	-13	-10	11	-1	-17	-9

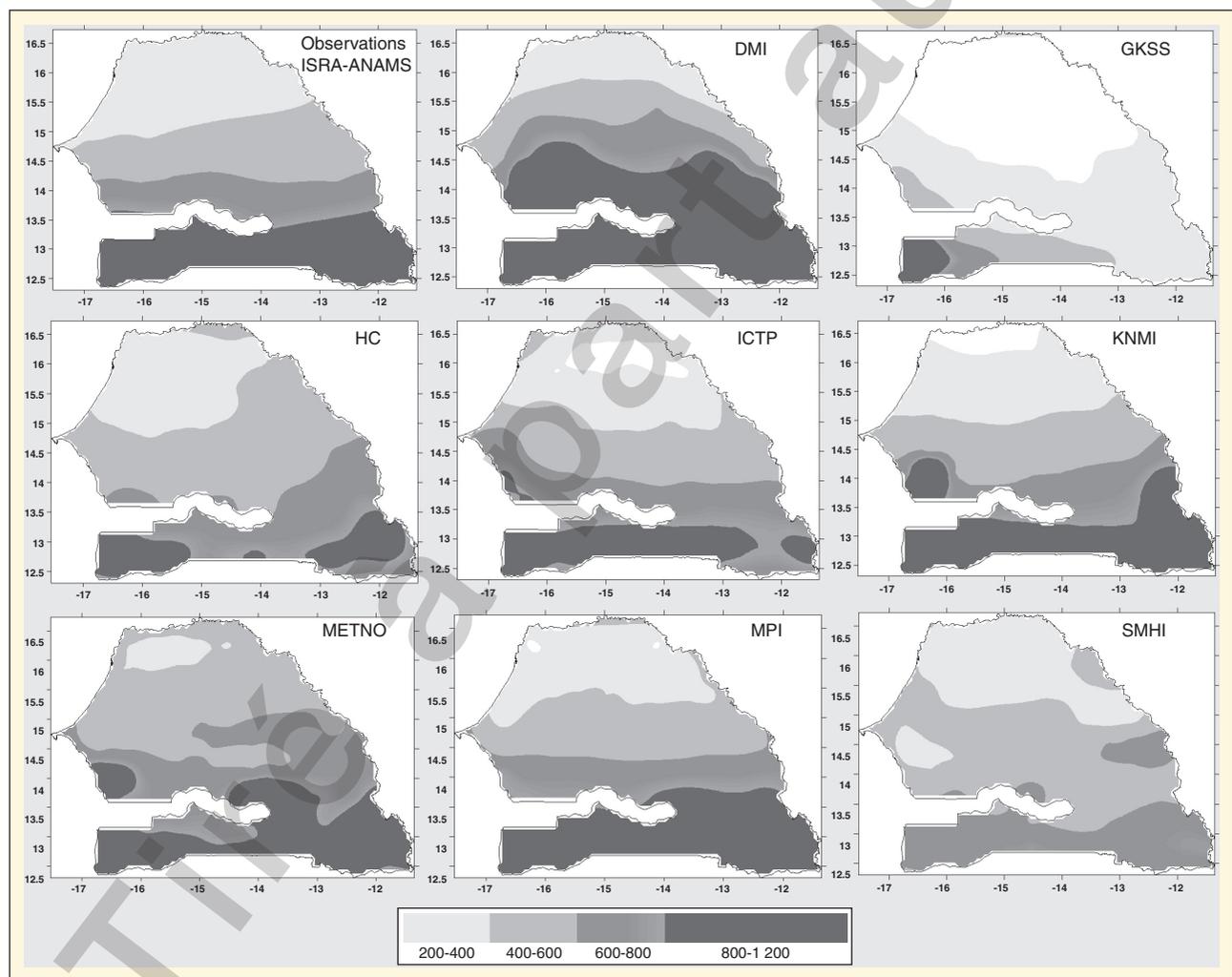


Figure 2. Les cumuls saisonniers moyens des pluies observées (observations) et simulées par les huit modèles régionaux de climat (MRC), organisées en quatre zones agroclimatiques : nord (< 400 mm/an), centre nord (400-600 mm/an), centre sud (600-800 mm/an) et sud (> 800 mm/an).

sous-estimer les pluies, mais peuvent également les surestimer pour certaines zones. Si l'on considère l'ensemble des sorties des modèles, les zones pour lesquelles ils sont globalement les plus cohérents entre eux sont le centre nord et la zone sud avec 6 biais négatifs pour 2 positifs, alors que les résultats sont moins cohérents dans la zone nord (4 biais positifs et 4 négatifs) et au centre sud (5 positifs et 3 négatifs). Les variabilités interannuelles des cumuls sont, dans l'ensemble, bien reproduites avec des coefficients de variations (CV) conformes aux observations (*tableau 2*), sauf en ce qui concerne le modèle GKSS pour lequel on observe une variabilité interannuelle deux fois supérieure aux autres, qui s'explique cependant en partie par la faiblesse des précipitations simulées.

Les modèles ont tous tendance à surestimer très fortement le nombre d'événements pluvieux : les nombres de jours pluvieux simulés sont en moyenne 2 à 3 fois supérieurs à ce que l'on observe dans la réalité, et peuvent même être 5 fois supérieurs à celle-ci (*tableau 3*). Cette augmentation du nombre de jours pluvieux s'observe du nord vers le sud sauf pour le MPI dont le minimum se trouve au centre avec 114 jours. Les biais positifs sur la fréquence des jours pluvieux observés pour les MRC sont proches de ceux des modèles de circulation générale (MCG) (Goddard *et al.*, 2001 ; Sylla *et al.*, 2010a), et il a été montré que les MRC surestiment en particulier les fréquences des traces de pluie (< 1 mm/jour) et faibles (< 10 mm/jour) (Salack, 2007). On

peut noter (*tableau 3*) que les modèles qui génèrent les cumuls pluviométriques les plus biaisés (DMI, GKSS, SMHI) sont ceux qui surestiment le moins les nombres de jours de pluie : ainsi le modèle GKSS qui était le moins performant pour les cumuls est le plus performant pour le nombre des jours de pluie en ne les surestimant que 1,5 à 2 fois. Les variabilités interannuelles sur les nombres de jours pluvieux semblent conformes aux observations, c'est-à-dire relativement faibles (entre 10 et 15 %), mais compte tenu des fortes surestimations cela signifie qu'en réalité les variabilités simulées sont nettement plus faibles que dans la réalité. La *figure 3* présente les distributions moyennes interannuelles des pauses pluviométriques pour les quatre zones pluviométriques. La surestimation importante des nombres de jours pluvieux par les modèles régionaux se traduit au nord et au centre nord par une surestimation des nombres de pauses de moins de 5 jours. Par contre cela n'est pas le cas pour les autres zones, ce qui signifie que les modèles y simulent souvent des séquences d'événements pluvieux sur plusieurs jours successifs. Les occurrences de pauses de 5 à 15 jours sont globalement sous-estimées par l'ensemble des modèles sur toutes les zones. Cela découle clairement de la surestimation des nombres de jours pluvieux. Enfin on note que les MRC ont tendance à générer un peu trop de pauses de plus de 15 jours, et surtout de plus de 20 jours. Mais cependant pour ces types de pause on reste quoi qu'il en soit dans des fréquences d'occurrence

extrêmement faibles. Dans l'ensemble c'est le modèle GKSS qui reproduit le mieux la distribution des pauses.

Les biais des modèles régionaux dans la simulation des rendements

Les insuffisances des modèles régionaux pour représenter correctement la pluie se répercutent sur les simulations des rendements (*tableau 4*). Ainsi on remarque des biais sur les rendements qui varient de - 66 à 60 % du nord au centre sud du pays alors qu'à l'extrême sud ces biais vont de - 33 à 5 %. Les biais les plus importants sont observés pour le modèle GKSS. La variabilité interannuelle des rendements est assez mal représentée avec des coefficients de variation le plus souvent inférieurs à ceux des rendements estimés à partir des observations, mais qui parfois sont très supérieurs à la réalité (*tableau 4*).

Le biais dans la représentation de la quantité d'eau totale disponible au cours du cycle de la plante est la première cause dans le biais des rendements simulés par les MRC (*figure 4*), expliquant globalement 36 % de la variance des erreurs dans les simulations de rendement. Les erreurs sur les pluviométries simulées ont plus d'impact sur les rendements au nord (64 % d'explication de la variance des erreurs) qu'au sud (25 %). L'amplitude des biais liés à une mauvaise représentation du cumul pluviométrique mensuel (MRC_{cum}) est la plus forte (avec des biais variant de - 80 à + 60 % environ ; *figure 5*, au centre) alors que le biais lié à la variabilité

Tableau 3. Évaluation des nombres de jours pluvieux annuels simulés par les modèles régionaux de climat (MRC) sur la période 1991-2007.

Zone	Paramètre	Obs	DMI	GKSS	HC	ICTP	KNMI	METNO	MPI	SMHI	Moy.MRC
Nord (NZ)	Moy. (/an)	21	63	39	135	79	128	91	119	72	83
	Biais (%)		197	84	536	272	499	328	457	240	327
	Cv (%)	14	0	30	0	12	9	9	7	0	13
Centre nord (CN)	Moy. (/an)	33	84	53	144	99	135	105	114	84	95
	Biais (%)		153	61	336	198	307	218	246	154	209
	Cv (%)	12	0	22	0	10	7	8	6	0	10
Centre sud (CS)	Moy. (/an)	41	108	76	157	123	152	118	127	85	110
	Biais (%)		163	86	283	201	272	189	211	107	189
	Cv (%)	13	0	14	0	9	6	8	6	0	9
Sud (SZ)	Moy. (/an)	62	123	107	179	148	175	144	157	127	136
	Biais (%)		98	73	190	139	182	133	154	105	134
	Cv (%)	11	0	11	0	6	5	6	5	0	7
Sénégal	Moy. des biais (%)		153	76	336	203	315	217	267	152	215

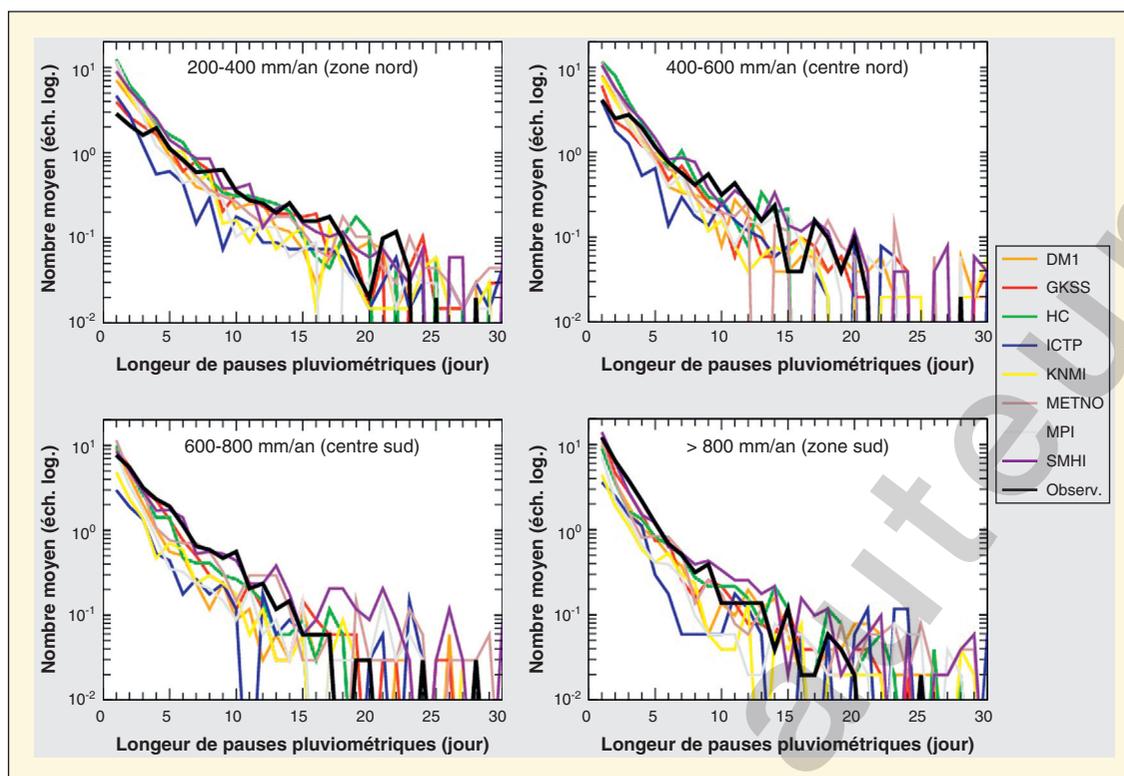


Figure 3. Distributions intrasaisonniers des pauses pluviométriques (périodes de jours successifs sans pluie) observées et simulées par les modèles régionaux de climat (MRC) pour les quatre zones agroclimatiques considérées.

intrasaisonniers (MRC_{dist}) est plus faible (entre - 40 et +40 % ; *figure 5*, à droite). La variabilité intrasaisonniers a un rôle important dans la façon dont les pluies sont utilisées au cours de la saison de croissance de la plante : la *figure 6* met

en évidence la relation non linéaire entre les rendements simulés et la pluie cumulée pendant le cycle de culture. Les rendements maximaux peuvent être obtenus dès 350 mm environ et avec les pluies observées ils sont toujours atteints

au-delà de 550 mm. Les rendements obtenus avec les pluies observées ne diminuent pas quand les cumuls pluviométriques augmentent au-delà de 550 mm alors que dans la réalité ce peut-être le cas car le rayonnement peut

Tableau 4. Évaluation des rendements simulés par les forçages MRC_{orig} de SARRAH sur la période 1991-2007.

Zone	Paramètre	Obs	DMI	GKSS	HC	ICTP	KNMI	METNO	MPI	SMHI	Moy.MRC
Nord (NZ)	Moy. (kg/ha)	1 054	1 239	612	1 234	1 465	1 402	1 681	929	786	1 169
	Biais (%)		18	-42	17	39	33	59	-12	-25	11
	Cv (%)	60	16	73	57	76	9	26	49	41	43
Centre nord (CN)	Moy. (kg/ha)	2 140	3 106	867	2 408	3 028	2 774	2 336	2 534	1 372	2 303
	Biais (%)		45	-59	13	42	30	9	18	-36	8
	Cv (%)	32	6	11	6	6	1	6	8	15	7
Centre sud (CS)	Moy. (kg/ha)	2 851	3 472	967	3 067	3 360	3 487	3 162	3 235	2 147	2 862
	Biais (%)		22	-66	8	18	22	11	13	-25	0
	Cv (%)	10	4	5	0	9	1	0	8	30	7
Sud (SZ)	Moy. (kg/ha)	3 619	3 795	2 410	3 345	3 815	3 795	3 050	3 765	2 789	3 346
	Biais (%)		5	-33	-8	5	5	-16	4	-23	-8
	Cv (%)	8	6	47	6	8	6	10	8	16	13
Sénégal	Moy. des biais (%)		23	-50	8	26	23	16	6	-27	3

MRC : modèles régionaux de climat.

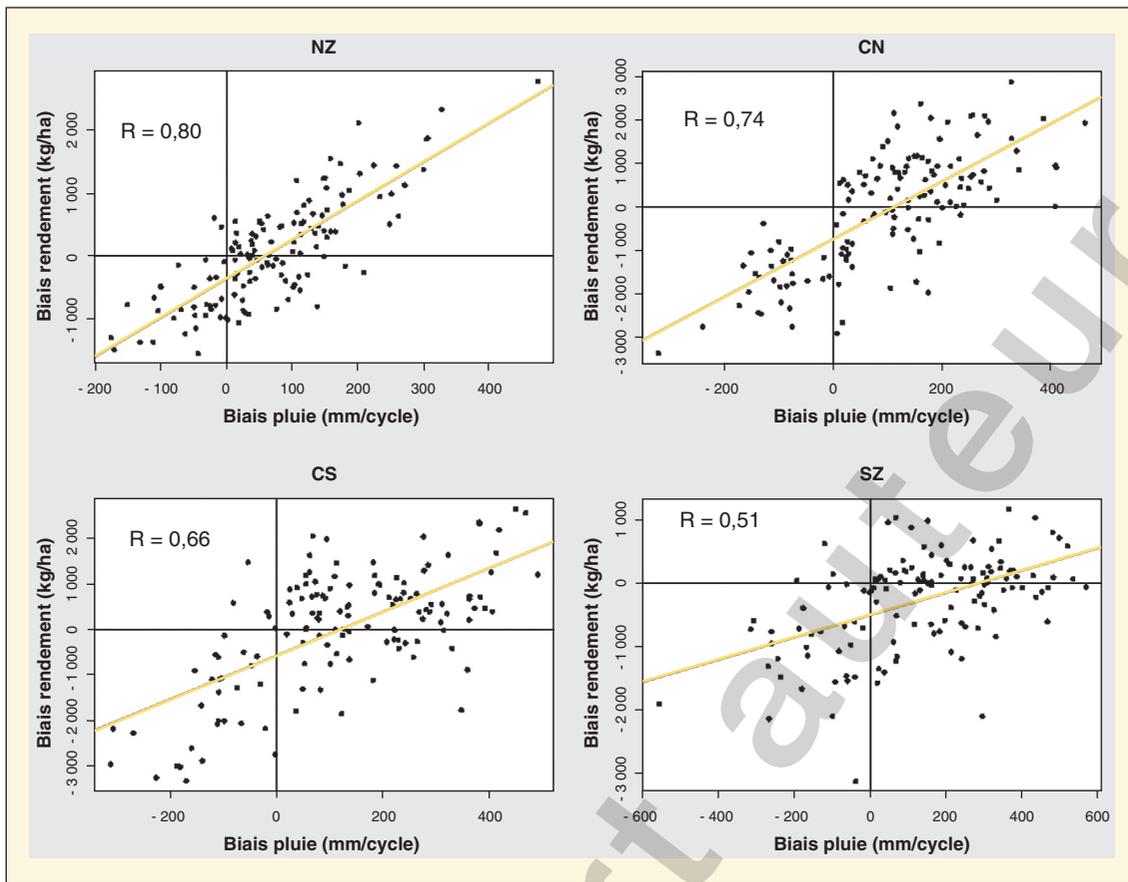


Figure 4. Relation entre les biais sur les rendements simulés (kg/ha) et les biais sur les pluies simulées (cumulées sur les cycles) (mm/cycle) des modèles régionaux de climat (MRC).

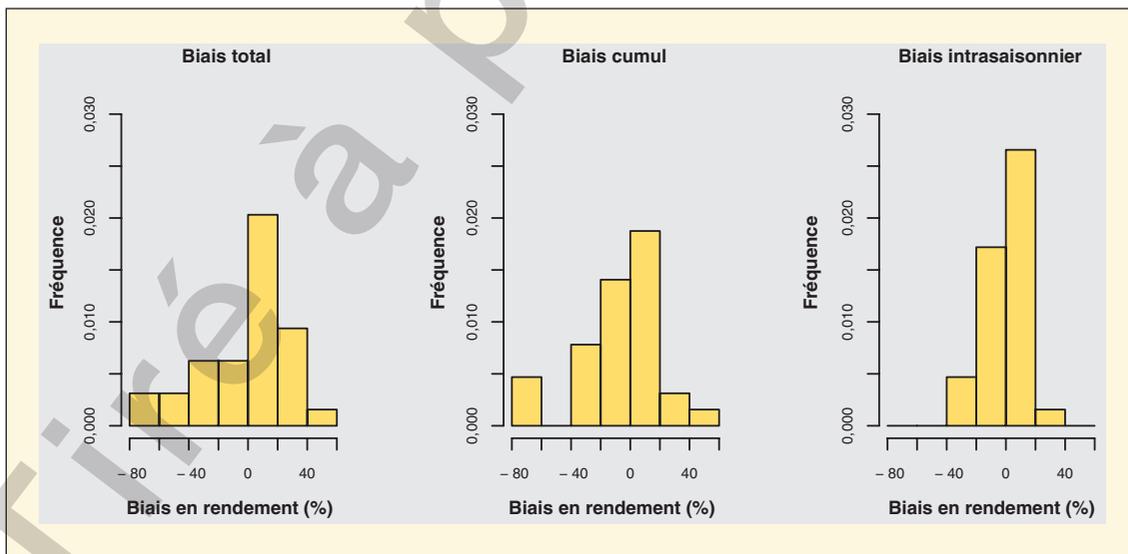


Figure 5. Distributions des biais sur les rendements simulés (%) issus des différents forçages.

À gauche, les biais moyens issus des données originales des modèles régionaux de climat (MRC_{orig}). Au centre, les biais largement attribués aux cumuls journaliers de la pluie dans MRC (scénario de forçage MRC_{cum}). À droite les biais largement attribués aux cumuls journaliers de la pluie dans MRC (scénario de forçage MRC_{dist}).

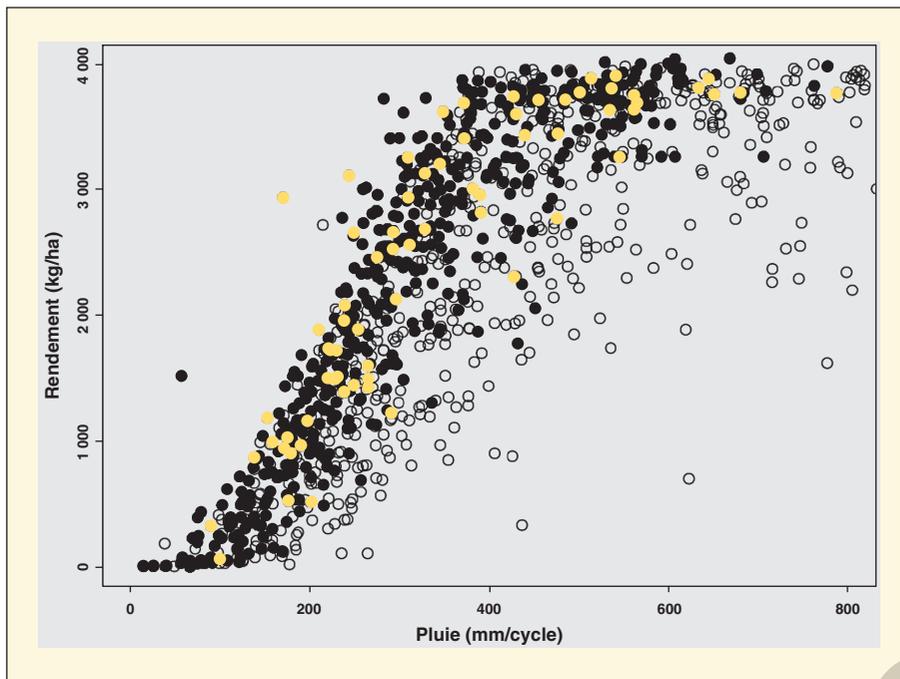


Figure 6. Rendements simulés (kg/ha) en relation avec les pluies (cumulées sur les cycles de culture) pour les différents forçages selon les pluies observées (points jaunes), les pluies simulées originales MRC_{orig} (cercles blancs) et les pluies MRC_{cum} pour lesquelles l'intrasaisonnier est corrigé mais il y a des biais sur les cumuls (points noirs).

MRC : modèles régionaux de climat.

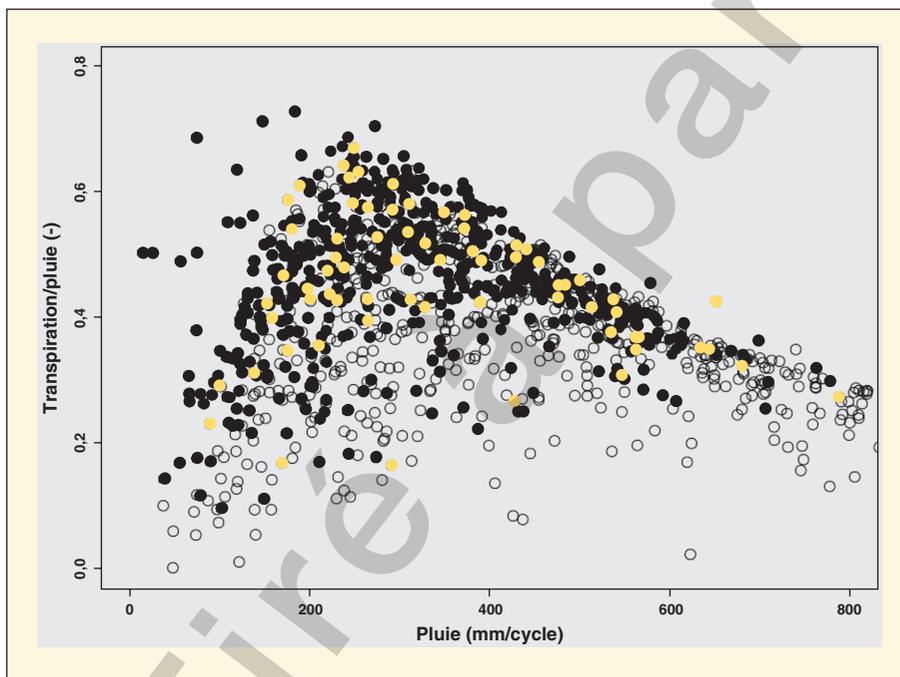


Figure 7. Efficacité des pluies (rapport entre la transpiration et la pluie) en relation avec la pluviométrie (cumulées sur les cycles de culture) pour les différents forçages selon les pluviométries observées (points jaunes), les pluviométries simulées originales MRC_{orig} (cercles blancs), et les pluviométries MRC_{cum} pour lesquelles l'intrasaisonnier est corrigé mais il y a des biais sur les cumuls (points noirs).

MRC : modèles régionaux de climat.

devenir limitant (Baron *et al.*, 2005), l'engorgement du sol également ainsi que les problèmes biotiques : la raison en est que nous travaillons avec des moyennes climatiques interannuelles et les aspects biotiques et d'engorgement ne sont pas considérés.

Le modèle SARRAH simule séparément l'évaporation du sol et la transpiration de la plante (Sultan *et al.*, 2005, Baron *et al.*, 2005). Ces deux processus s'effectuent de façon simultanée (évapotranspiration) et varient en fonction de la demande atmosphérique, du taux de couverture et des phases phénologiques de la plante. Cependant SARRAH distingue la demande potentielle de la consommation réelle, pour chaque processus en fonction de l'eau disponible pour la partie évaporation et la partie transpiration. L'évaporation potentielle est contrainte par l'eau disponible pour ce processus (notion de réservoir de surface), la transpiration potentielle est contrainte par la fraction d'eau disponible aux racines (notion de réservoir des racines). Lorsque la variabilité intrasaisonnaire des pluies est correctement représentée (simulation de contrôle en rouge et simulation MRC_{cum} en noir sur les figures 6 et 7), on observe une plus grande efficacité des pluies et des rendements plus importants pour un même cumul pluviométrique.

Conclusions et perspectives

Si la majeure partie des études sur les impacts du climat utilise de MRC, cette étude est l'une des premières à mettre en évidence les erreurs liées au choix d'un modèle régional dans la quantification des impacts. A travers l'exemple de l'agriculture au Sénégal et l'utilisation d'un ensemble unique de simulations régionales sur l'Afrique de l'Ouest, on montre qu'il existe une grande dispersion dans la représentation de la pluviométrie d'un modèle régional à l'autre (et même quelques fois pour un même modèle régional avec deux jeux de paramètres différents) tant à l'échelle saisonnière qu'à l'échelle intrasaisonnaire. Ces biais introduisent des erreurs importantes dans l'estimation des impacts agronomiques du climat. De telles erreurs peuvent être à même d'invalider des conclusions sur les impacts du changement climatique basés sur l'utilisation d'un seul modèle régional.

Notre étude confirme également l'intérêt de développer des méthodes de correction des biais (Oettli *et al.*, 2011). On a pu constater que l'essentiel des biais dans les rendements simulés avec les modèles régionaux provient de leur mauvaise représentation de la quantité totale de pluie pendant le cycle de la plante. Néanmoins, on montre le rôle non négligeable de la représentation de la variabilité intrasaisonnière qui modifie l'efficacité des pluies au cours du cycle de croissance de la plante et affecte le rendement.

Enfin cette étude souligne l'importance d'une approche multimodèle pour quantifier les incertitudes dans les études d'impacts comme cela est préconisé par les projets et programmes internationaux (ENSEMBLES, CORDEX). Nos résultats mettent également en évidence l'urgence de réduire l'incertitude dans les processus atmosphériques qui contrôlent les pluies de mousson dans les modèles de climat afin d'améliorer la simulation des pluies. Le projet AMMA et AMMA-MIP (Hourdin *et al.*, 2010) est un cadre idéal pour réaliser des avancées en ce sens. ■

Remerciements

Nous sommes particulièrement reconnaissants à l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF) pour le soutien à la mobilité et à la *Deutscher Akademischer Austauschdienst German Academic Exchange (DAAD)* pour son soutien financier. Les données « ENSEMBLES data » utilisées ici proviennent du EU FP6 Integrated Project ENSEMBLES (Contract number 505539). <http://ensemblesrt3.dmi.dk>. Ce travail a bénéficié du support de l'Agence nationale de la recherche (ANR) à travers le projet ESCAPE (ANR-10-CEPL-005 ; <http://www.locean-ipsl.upmc.fr/~ESCAPE>).

Références

Baron C, Sultan B, Balme M, Sarr B, Traoré S, Lebel T, Janicot S, Dingkuhn M, 2005. From GCM grid cell to agricultural plot : scale issues affecting modeling of climate impact. *Philosophical Trans-*

actions of the Royal Society B 360 (1463) : 2095-108. doi : 10.1098/rstb.2005.1741.

Berg A, Sultan B, De Noblet N, 2010. What are the dominant features of rainfall leading to realistic large-scale crop yield simulations in West Africa? *Geophysical Research Letters* 37. doi : 10.1029/2009GL041923.

Dingkuhn M, Baron C, Bonnal V, *et al.*, 2003. Decision-support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. In : Struif-Bontkes 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, États-Unis) : International Fertilizer Development Center (IFDC) ; Center for Agricultural & Rural Cooperation.(CTA).

Goddard L, Mason SJ, Zebiak SE, Ropelewski CF, Basher R, Cane MA, 2001. Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. *International Journal of Climatology* 21 : 1111-52.

Hansen JW, Challinor A, Ines A, Wheeler T, Moron V, 2006. Translating climate forecasts into agricultural terms : advances and challenges-Translating. *Climate Research* 33. 27-41.

Herrera E, Ouarda TBMJ, Bobée B, 2006. Méthodes de désagrégation appliquées aux modèles du climat global Atmosphère-Océan (MCGAO). *Revue des Sciences de l'eau* 19 : 297-312.

Heuvelink GBM, 1998. Uncertainty analysis in environmental modelling under a change of spatial scale. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50 : 255-64.

Hourdin F, Musat I, Guichard F. *et al.*, 2010. Amma-model intercomparison project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. doi : 10.1175/2009BAMS2791.1.

Jones RG, Noguier M, Hassell DC, Hudson D, Wilson SS, Jenkins GJ, Mitchell JFB, 2004. *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*. Exeter (UK) : Met. Office Hadley Center.

Mishra A, Hansen JW, Dingkuhn M, Baron C, Traoré SB, Ndiaye O, Ward MN, 2008. *Agricultural and forest meteorology* 148 : 1798-814.

Ndiaye O, Ward NM, Thiaw W, 2011. Predictability of seasonal sahel rainfall using GCMs and lead-time improvements through the use of a coupled model. *Journal of Climate* 24 : 1931-49. doi : 10.1175/2010JCLI3557.1.

Oettli P, Sultan B, Baron C, Vrac M, 2011. Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa? *Environmental Research Letter* 6 : 014008 (9pp). doi : 10.1088/1748-9326/6/1/014008.

Paeth H, Hall MJN, Gaertner AM *et al.*, 2011. Progress in regional downscaling of West African precipitation. *Atmospheric Science Letter* 12 : 75-82. doi : 10.1002/asl.306.

Redelsperger J-L, Thorncroft C, Diedhiou A, Lebel T, Parker D, Polcher J, 2006. African monsoon, multidisciplinary analysis (AMMA) : an International research project and field campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87 : 1739-46.

Salack S, 2007. *Caractérisation de la variabilité saisonnière de la pluie dans les modèles de climat, dans une perspective d'études d'impacts en agriculture*. Mémoire de Master 2 en Sciences de l'ingénieur, université Cheikh Anta Diop de Dakar (Ucad), Sénégal.

Salack S, Muller B, Gaye AT Gaye, 2011. Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I : integration of local to sub-regional trends and variability. *Theoretical and Applied Climatology*. doi : 10.1007/s00704-011-0414-z.

Sultan B, Baron C, Dingkuhn M, Sarr B, Janicot S, 2005. Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology* 128 : 93-110.

Sultan B, Janicot S, Dingkuhn M, Muller B, Traoré S, Sarr B, 2008. Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest : une illustration des problèmes majeurs. *Sécheresse* 19 : 29-37. doi : 10.1684/sec.2008.0122.

Sylla MB, Gaye AT, Pal JS, Jenkins GS, Bi XQ, 2010a. High-resolution simulations of West African climate using regional climate model (RegCM3) with different lateral boundary conditions. *Theoretical and Applied Climatology*. doi : 10.1007/s00704-009-r-r0110-4.

Sylla MB, Dell'Aquila A, Ruti PM, Giorgi F, 2010b. Simulation of the intraseasonal and the interannual variability of rainfall over West Africa with RegCM3 during the monsoon period. *International Journal of Climatology*. doi : 10.1002/joc.2029.

Traoré SB, Agali A, Muller B, *et al.*, 2011. Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. *Atmospheric Science letter* 12 : 89-95. doi : 10.1002/asl.295.

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 Center.

Zorita E, Von Storch H, 1999. The analog method - a simple statistical downscaling technique : comparison with more complicated methods. *Journal of Climate* 12 : 2474-89.