



**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
saisonnères**

Philippe Roudier

► **To cite this version:**

Philippe Roudier. 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. Milieux et Changements globaux. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), 2012. Français. <NNT : 2012EHESnnnn>. <tel-00874724>

HAL Id: tel-00874724

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00874724>

Submitted on 18 Oct 2013

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.

ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES EN SCIENCES SOCIALES

Spécialité:
Économie de l'environnement et ressources naturelles

THÈSE DE DOCTORAT

Pour l'obtention du grade de Docteur de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales

Présentée et soutenue publiquement le 2 mars 2012 par:

Philippe Roudier

Réalisée au:

Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), UMR CNRS -
EHESS - ENPC - AgroParisTech - CIRAD - Météo France

et au:

Laboratoire d'Océanographie et du Climat: Expérimentation et Approches Numériques (LOCEAN)
UMR CNRS-UPMC-IRD-MNHN

***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***

Jury

Wolfgang Cramer	Rapporteur
Bernard Fontaine	Rapporteur
Jean-Charles Hourcade	Examineur
Ousmane Ndiaye	Examineur
Carla Roncoli	Examineur
Philippe Quirion	Directeur de thèse
Benjamin Sultan	Co-directeur de thèse

Résumé:

Cette thèse cherche à étudier les relations climat/agriculture en Afrique de l'Ouest dans un contexte de croissance démographique nécessitant une augmentation des rendements agricoles futurs. Nous cherchons à caractériser dans un premier temps les changements climatiques passés et futurs dans la région, puis à passer en revue plusieurs études qui donnent une estimation de l'impact du climat futur sur les rendements agricoles de la sous-région, afin de produire des résultats robustes et de souligner les limites de ces études. La valeur médiane d'évolution des rendements futurs se situe ainsi vers -11%, et cette valeur est robuste au type de modèle agronomique employé. Il semble de plus nécessaire de travailler plus en détail sur les scénarii futurs, parfois trop limités et sur les différences entre variétés qui peuvent être importantes. Nous soulignons également l'hétérogénéité des résultats à l'échelle de la sous-région.

Nous nous fondons dans un deuxième temps sur ces constatations pour réaliser une étude d'impact originale utilisant des données observées sur 35 stations météorologiques en Afrique de l'Ouest. Pour cela, nous définissons 35 scénarii possibles fondés sur cinq anomalies de pluie (de -20% à +20%) et sept de température (de +0°C à +6°C) et nous simulons les rendements pour trois variétés contrastées de mil et trois de sorgho. Les résultats montrent entre autre une évolution négative du rendement moyen principalement due à l'augmentation de température que la pluie peut seulement atténuer ou aggraver. On note également un impact plus négatif pour les variétés à cycle court et constant que pour les variétés sensibles à la photopériode. Enfin, pour une même anomalie de température, si on considère comme équiprobables les cinq scénarii de pluie, la probabilité d'avoir une forte baisse des rendements est plus importante dans le Sud de la sous-région.

Les constatations sur la forte variabilité interannuelle de la pluie (et donc des rendements) et sur le climat futur incertain nous poussent donc à étudier l'intérêt pour les paysans sahéliens de prévisions climatiques saisonnières qui donnent avant le début de la saison des pluies une information sur la catégorie du cumul pluviométrique (plutôt sec, normal ou humide). Cette prévision permet ainsi de minimiser l'impact de l'aléa pluviométrique et est robuste à l'incertitude du changement climatique. Nous calculons de ce fait la valeur d'une telle information pour les cultivateurs de mil nigériens en utilisant un modèle économique représentant les stratégies des agents considérés (choix culturels, aversion au risque...). Les résultats montrent un impact sur le revenu globalement positif, même en années sèches et avec une prévision d'une précision proche de l'existant. Ainsi, cette prévision imparfaite donne une augmentation du revenu de +6.9% sur les 18 années. Ce gain est légèrement supérieur avec une prévision parfaite (+11%) et atteint +34% si on fournit des informations supplémentaires sur le début et la fin de la saison: ces informations permettent en effet d'utiliser de nouvelles stratégies culturelles

Enfin, afin d'étudier des points que l'évaluation théorique laissait en suspens nous élaborons au Sénégal des ateliers participatifs qui visent à étudier avec les acteurs locaux les changements de stratégies culturelles en réaction à des prévisions climatiques (saisonnières et décennales), ainsi que le gain engendré par ces prévisions sur les rendements. L'impact sur les rendements est évalué avec l'aide d'un expert et montre que les prévisions ont certes un effet nul dans 62% des cas, mais qu'il est positif dans 31%. Ces résultats dépendent cependant des villages étudiés.

Mots-clefs: Afrique de l'Ouest, agriculture, climat, prévision saisonnière, impacts, rendements agricoles.

Abstract:

In this thesis, we first aim at determining past and future climate changes in West Africa. This leads us to a review of all the studies assessing the impact of future climate changes on agricultural yields in the area, in order to give robust results. The median value of all relative changes of yield is -11%, hence the relevance for future studies to define a large range of climatic scenarios, and to focus on the differences among cultivars and between the Northern and Southern parts of West Africa.

Based on these conclusions, we next intend to evaluate the impact of future climate change on West African yields using a network of thirty five meteorological stations providing daily historical data (1961/1990). To do so, it is necessary for us to define thirty five climatic scenarios based on rainfall and temperature anomalies and to compute yields for three contrasted millet and sorghum cultivars. Results reveal a negative evolution of average yield, mainly driven by temperature rise. Rainfall anomalies can only compensate (positive anomaly) or aggravate (negative) this negative yield change. We also find that potential impacts are more pessimistic for cultivars with a constant cycle length.

Given these previous findings about high year-to-year variability of rainfall (thus entailing a variability of yields) and given the uncertain future climate, we are led to study next what interest the farmers would have in having climatic information such as seasonal forecasts.

These forecasts can be used to minimize the impacts of rainfall variability and are robust to climate change. We compute the value of such forecasts for millet growers in Niger, using a simple economic model which represents farmers' strategies (cropping practices, risk aversion). Results reveal a positive impact of such forecasts on average income, even for dry years and with a forecast accuracy close to a real one. This imperfect forecast leads to a +6.9% increase in income on the whole period (eighteen years). This increase is slightly more important considering a forecast with perfect accuracy (+11%) and reaches +34% if other information such as the onset and the offset of the rainy season are given.

Finally, we develop participatory workshops in Senegal (i) to study precisely how farmers change their cropping strategies with seasonal and decadal forecasts and (ii) to quantify the impact of such forecasts on yields. This impact is assessed by an expert and reveals that forecasts have mainly no impact on yields (62%). However, it is positive in 31% of cases.

Keywords: West Africa, agriculture, climate, seasonal forecast, impacts, crop yields.

Remerciements

D'après certains individus cyniques, les remerciements seraient la partie la plus lue d'une thèse (R. Boroumand, communication personnelle). Bien que je ne cautionne absolument pas ce point de vue, je me méfie de la pertinence de la réflexion de mon collègue de Harvard et je vais donc prendre un soin tout particulier pour rédiger ces remerciements à cette heure de pré-bouclage.

Naturellement, mes premiers remerciements vont à Jean-Charles Hourcade qui a été une des rares personnes que j'avais contactées pour une thèse à m'avoir répondu et à avoir étudié mon profil, même si mes centres d'intérêt n'étaient pas exactement ceux du CIREC. Cet accueil au sein du CIREC et le financement du réseau R2DS, que je remercie également, m'ont permis de travailler dans des conditions optimales. Je dois par la suite remercier mes deux encadrants, Philippe et Benjamin, qui m'ont clairement bien guidé tout au long de ces trois ans et qui m'ont donné les moyens de mener à bien bon nombre de projets. Je les remercie aussi particulièrement pour avoir subi (presque) sans rien dire mon "effet spam" qui m'a vu leur envoyer 1286 mails en trois ans. Je préfère ne pas compter le nombre de documents... Tant que nous sommes dans ceux qui ont pu aider à encadrer cette thèse, je voudrais aussi remercier spécialement Christian Baron et Bertrand Müller qui m'ont guidé, l'un dans les méandres de SARRA-H et l'autre sur les routes africaines. Je pense également à un encadrement d'un tout autre type, mais qui est ô combien important parfois, l'encadrement administratif: merci à Eléonore, Céline et Catherine, entre autres, pour m'avoir expliqué x fois comment remplir les formulaires E4211 et consorts...

Mes pensées se posent dans un deuxième temps sur toutes les personnes qui m'ont permis, en Afrique et en France de mener à bien ce travail: Agali Alhassane et Seydou Traoré pour leur travail à Aghrymet qui a permis de réaliser l'étude sur le Niger, Patrick d'Aquino qui m'a permis de mettre en place des ateliers au Sénégal, tout comme Arame Soumaré, les techniciens agronomes de l'ISRA, les chercheurs de l'ANAMS, notre traducteur Mamadou Ka et bien sur les agriculteurs de Paoskoto et Bacfassagal. Je voudrais aussi remercier les nombreux anonymes qui collectent les données qui nous servent après à réaliser toutes ces études. Maintenant, pour les plus jeunes (désolé pour les moins jeunes...), Romain Marteau, Johanna Ramarohetra, Pascal Oettli, Alexis Berg, Laurianne Batté dont les compétences m'ont grandement aidé. J'ai également reçu des appuis techniques plus ponctuels de nombreuses personnes, du CIREC et d'ailleurs que je remercie (petite réflexion personnelle, finalement, le vrai problème des remerciements c'est de trouver des synonymes de "remercier"): Franck, Elisabetta, Matthieu, Patrice, Stéphane, Daniel, Eric, Ruben, David...

Enfin, je tenais à remercier les membres de mon jury pour leurs commentaires sur ce travail et pour être venus, parfois de loin, à ma présentation orale.

Nous en venons maintenant à ce qui est assez peu relié au travail directement mais plus à l'ambiance (studieuse, bien sûr!) l'entourant. Etant donné que cela concerne un bon nombre de personnes, je vais faire des groupes, si certains ne sont pas dans le bon groupe, ils pourront m'adresser une réclamation (je suis désormais dans l'open space, à côté du monsieur chevelu).

-CIREC soccer team: Camille, Thierry, Henri (oui, je fais exprès de mettre Thierry et Henri à la suite), Valentin (le monsieur chevelu susdit), Paolo, Cédric, Patrice-aux-trois-poumons, Christophe. Le lecteur attentif remarquera que ça ne fait que 9 personnes (dans les bons jours)...on compense les joueurs manquants par un gros niveau technique.

-CIREC apéro team: principalement Thomas et son sabre creux, Thierry et Françoüé, docteur ès bières belges. Patrice j'hésite parce que le jus de tomate, c'est pas vraiment l'apéro.

-CIREC café team: spécial remerciement à ceux qui s'occupent de l'approvisionnement (*i.e.* Camille, Elsa, Philippe). Et à tous les locataires de la salle café, spécialement ceux arrivant à l'aube, à l'heure où blanchit la campagne (Ruben!).

-CIREC bureau 206+207 team: Antoine+Hypathie+François+Thierry+Patrice. Je dois adresser toutes mes excuses à Antoine et à Thierry pour avoir chanté et sifflé pendant 3 ans (en travaillant, naturellement...)

-CIREC Gis LARSEN team: Boroumand (fils caché de Michel Fugain, cherchez pourquoi...), Lacuillère et Baptiste. Horaires d'ouverture 11h-17h.

Bon alors je ne sais pas comment faire mais certains ne rentrent dans aucune catégorie (Meriem, Aurélie, Julie, Adrien, Becki, Laure, Vinz, Gaëtan...). Bon je crée pour vous la catégorie "je-vous-aime-bien-mais-je-sais-pas-dans-quelle-catégorie-vous-mettre CIREC team".

Enfin il faut remercier les gens qui n'ont rien à voir avec le CIREC ni le LOCEAN, ni même le CNRS, qui ne savent parfois même pas ce que je fais vraiment ("mais en fait quand tu fais une thèse, tu fais quoi de tes journées?") mais qui m'ont permis de pouvoir réaliser des études puis une thèse et qui m'ont aidé à rester dans la fameuse bonne ambiance pendant sa réalisation. En tête de liste la famille dont je fus le Tanguy notoire pendant un temps (et un scientifique, en plus!) et les grands-parents maternels et paternels. Je n'oublie bien sûr pas Diese, les Engesiens, les Carolingiens, Sensei Degas et Aurore. Vous êtes chanceux, je vais vous forcer à lire au moins l'intro et la conclusion de cette thèse. Beaucoup de gens aimeraient être à votre place...

Je vous souhaite maintenant une bonne lecture de cette thèse. Il vous reste 188 pages, courage! Pour ceux à qui j'ai imprimé un exemplaire et par là même tué un chêne centenaire, je vous rappelle qu'une thèse ne sert pas à caler un canapé Ikea bancale. Un peu de respect que diable!

Préambule

Il y a douze ans de cela, j'avais choisi en cours de français d'apprendre et de réciter ce poème de David Diop car j'aimais la vision que ce poète qui ne connaissait lui non plus pas l'Afrique donnait de ce continent. Une vision poétisée qui rejoignait en certains points et enrichissait en beaucoup d'autres mon imaginaire de l'Afrique, nourri pour ma part d'histoires familiales. Ce poème ouvre donc ce travail car d'une certaine manière il représente une part du cheminement qui m'a poussé, depuis le début de mes études, à vouloir travailler sur l'hydrologie et l'agronomie tropicales.

J'ai certes acquis depuis une perception plus scientifique et moins romancée de l'Afrique mais elle n'a jamais perdu son voile poétique.

Afrique mon Afrique

*Afrique
Afrique mon Afrique
Afrique des fiers guerriers dans les savanes ancestrales
Afrique que chante ma grand-mère
Au bord de son fleuve lointain
Je ne t'ai jamais connue
Mais mon regard est plein de ton sang
Ton beau sang noir à travers les champs répandu
Le sang de ta sueur
La sueur de ton travail
Le travail de l'esclavage
L'esclavage de tes enfants*

*Afrique dis-moi Afrique
Est-ce donc toi ce dos qui se courbe
Et se couche sous le poids de l'humilité
Ce dos tremblant à zébrures rouges
Qui dit oui au fouet sur les routes de midi*

*Alors gravement une voix me répondit
Fils impétueux cet arbre robuste et jeune
Cet arbre là-bas
Splendidement seul au milieu des fleurs
Blanches et fanées
C'est L'Afrique ton Afrique qui repousse
Qui repousse patiemment obstinément
Et dont les fruits ont peu à peu
L'amère saveur de la liberté.*

David Diop (Coups de Pilon, 1956)

Sommaire

Préambule	7
Sommaire	9
Introduction générale	13
Chapitre 1: Présentation des jeux de données utilisés et du modèle SARRA-H	21
1. Observations	23
1.1 Données pluviométriques et météorologiques à l'échelle de la station	23
1.1.1 Données IRD sur l'Afrique de l'Ouest (chapitre 3)	23
1.1.2 Données du Centre régional Aghrymet sur le Niger (chapitre 4)	23
1.1.3 Données de l'Agence Nationale de la Météorologie Sénégalaise sur le Sénégal (chapitre 5)	25
1.2 Données interpolées du Climate Research Unit (chapitre 3): pluie et température	25
1.3 Données agricoles issues d'essais en milieu paysan au Niger (chapitre 3 et 4)	26
1.4 Données de prix (chapitre 4)	27
1.5 Données FAO de rendement	27
2. Modélisation climatique	28
2.1 Projections futures (chapitre 3)	28
2.1.1 Modèles climatiques utilisés pour le quatrième rapport de l'IPCC (AR4)	28
2.1.2 Modèles climatiques utilisés pour le futur AR5	29
2.2 Prévisions saisonnières (chapitre 5)	30
2.3 Prévisions décennales (chapitre 5)	31
3. Modélisation agronomique: le modèle SARRA-H	31
3.1 Un moteur phénologique: base d'évolution des processus	31
3.2 Bilan hydrique: une dynamique de réservoirs	32
3.3 Bilan carboné: une dynamique de la biomasse	32
3.4 Variétés utilisées	33
3.5 Date de semis et de re-semis	33
Chapitre 2: Bilan de la littérature sur les changements climatiques passés et futurs en Afrique de l'Ouest et leurs impacts sur les rendements agricoles	35
1. Description de la zone d'étude générale: l'Afrique de l'Ouest	37
2. Climat passé et agriculture en Afrique de l'Ouest	39
2.1 Evolutions climatiques passées	39
2.1.1 Evaluation à l'aide de données météo	40
2.1.2 Evaluation du point de vue local	42
2.2 Evolution de la production agricole passée au regard des changements climatiques	44
2.2.1 Lien entre climat et rendement	44
2.2.2 Evolution passée	45
3. Climat futur en Afrique de l'Ouest	47
3.1 Température	47
3.2 Pluie	48

4. Evolution potentielle des rendements futurs: une revue (issu de Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P., Berg, A. (2011). The impact of future climate change on West African agriculture : what does the recent literature say ? Global Environmental Change 21: 1073-1083)	49
4.1 Matériel et méthodes	50
4.1.1 Méthodologie générale de travail	50
4.1.2 La méta-base de données	53
4.1.3 La méta-analyse	56
4.2 Résultats	57
4.2.1 Modèles agronomiques mécanistes vs modèles empiriques	58
4.2.2 Effet de l'amplitude du forçage radiatif	58
4.2.3 Effet des changements de températures et de précipitations	59
4.2.4 Différences entre les zones soudano-sahéliennes et guinéennes	60
4.2.5 Différences entre les cultivars	61
4.2.6 Effet fertilisant du CO ₂	61
4.2.7 Résultats concernant les variables monétaires	62
5. Résumé et conclusions du chapitre	63
5.1 Sur le climat passé et futur en Afrique de l'Ouest	63
5.2 Sur les rendements agricoles futurs	63
<i>Chapitre 3: Impact du climat futur sur les rendements de différentes variétés de sorgho et mil en Afrique de l'Ouest: résilience des variétés locales</i>	67
1. Introduction	69
2. Zone et méthodologie	69
2.1 Zone et variétés choisies	69
2.1.1 Zone	69
2.1.2 Variétés choisies et leurs principales caractéristiques	70
2.2 Scénarii climatiques	71
2.2.1 Définition	71
2.2.2 Comparaison de l'impact de ces différents scénarii sur les résultats	73
3. Résultats et discussion	75
3.1 Sur la présentation des résultats	75
3.2 Rendements observés vs rendements simulés par SARRA-H	76
3.2.1 A l'échelle de la sous région	76
3.2.2 Pays par pays	78
3.3 Evolution des rendements futurs en Afrique de l'Ouest	79
3.3.1 Evolution du rendement moyen	79
3.3.2 Evolution du coefficient de variation du rendement	83
3.4 Différences spatiales	85
3.5 Différences entre les variétés	87
4. Conclusions	90
<i>Chapitre 4: Evaluation ex-ante de la valeur des prévisions saisonnières pour les cultivateurs de mil au Niger</i>	93
1. Introduction	95
2. Méthodes et zone d'étude	97
2.1 Zone et données	97

2.2	Demande des agriculteurs sur les prévisions saisonnières et moyens de réactions	99
2.2.1	Choix de la variété de mil	100
2.2.2	Choix de la date de semis	101
2.2.3	Choix du niveau de fertilisation	101
2.3	Les trois types de scénarii considérés	102
2.3.1	Prévision imparfaite du tercile du cumul de pluie	102
2.3.2	Prévision parfaite du tercile du cumul de pluie	103
2.3.3	Prévision parfaite de la quantité de pluie cumulée et informations sur la date de début et de fin de l'hivernage.	103
2.3.4	Scénario de contrôle	103
2.4	Règle de décision des agriculteurs	104
3.	Résultats et discussion	105
3.1	Situation de contrôle	105
3.2	Stratégie d'adaptation en fonction du type de prévision	106
3.3	Revenu en fonction du type de prévision	109
4.	Conclusions	111
Chapitre 5: Evaluation par ateliers participatifs de l'impact sur les choix culturaux et les rendements des prévisions saisonnières et décennales dans deux villages du bassin arachidier sénégalais.		113
1.	Introduction	114
2.	Zone et méthodologie	115
2.1	Sites et données	115
2.1.1	Sites	115
2.1.2	Données utilisées	117
2.2	Méthodologie	117
2.2.1	Déroulement des ateliers tels qu'ils étaient prévus avant d'arriver	117
2.2.2	Choix des années	121
2.2.3	Les prévisions	123
2.3	L'évolution de conception des ateliers durant le jeu	125
2.3.1	Nombre d'années et gestion de l'atelier	125
2.3.2	Support de restitution	126
3.	Résultats et discussion	128
3.1	Les participants et leurs pratiques	128
3.1.1	Description des groupes de participants et des exploitations	128
3.1.2	Sous-échantillon	129
3.1.3	Techniques culturelles employées	130
3.2	Les prévisions fondées sur les connaissances des agriculteurs	132
3.3	Utilisation des prévisions scientifiques décennales	134
3.3.1	Résultats issus des discussions	134
3.3.2	Résultats issus des feuilles de jeu	134
3.3.3	Bilan sur les prévisions décennales	142
3.4	Utilisation des prévisions scientifiques saisonnières	143
3.4.1	Résultats des discussions	143
3.4.2	Résultats issus des feuilles de jeu	143
3.5	Impact sur les rendements	147
3.5.1	Notation par les participants	147

3.5.2	Notation d'expert _____	149
3.6	Discussion autour des prévisions scientifiques _____	153
3.6.1	Intérêt relatif pour les prévisions locales et scientifiques _____	153
3.6.2	Intérêt relatif pour les prévisions saisonnières et décennales _____	153
3.6.3	Les paramètres caractéristiques de la saison importants pour les agriculteurs _____	154
4.	Conclusion _____	154
4.1	Apports de ces ateliers _____	154
4.2	Améliorations futures _____	155
4.2.1	Panel _____	155
4.2.2	Déroulement et supports _____	156
	Synthèse générale et perspectives _____	157
1.	Synthèse des principaux résultats _____	157
1.1	Des variations climatiques passées liées à la production agricole _____	157
1.2	Un futur incertain mais chaud qui entraîne une baisse des rendements _____	157
1.3	Des baisses de rendement moyen du mil et du sorgho dues à la hausse de température _____	158
1.4	Un impact différent selon la zone et les variétés considérées _____	159
1.5	Les prévisions saisonnières permettent d'augmenter le revenu des agriculteurs nigériens _____	159
1.6	Les prévisions saisonnières et surtout décennales entraînent des changements de pratiques culturales _____	160
2.	Perspectives _____	161
2.1	Sur les projections de rendement futur _____	161
2.2	Sur les évaluations <i>ex ante</i> des prévisions saisonnières _____	162
2.3	Sur les ateliers participatifs et l'utilisation des prévisions saisonnières _____	163
	Références _____	165
	ANNEXES _____	179
1.	Annexe 1 : calcul du False Alarm Rate (FAR) et Hit Rate (HR), selon l'ECWMF _____	179
2.	Annexe 2: détails des projections (GCMs et scénarii SRES utilisés) _____	180
3.	Annexe 3 : pluviométrie des 7 années choisies et prévisions décennales données aux agriculteurs ("$< 10\text{mm}$" ; "$10:80\text{ mm}$" ; "$>80\text{ mm}$") _____	181
3.1	Bacfassagal _____	181
3.2	Paoskoto _____	182
4.	Annexe 4 : questionnaire individuel type utilisé à Paoskoto _____	185
5.	Annexe 5 : questionnaire individuel corrigé après les ateliers _____	187
6.	Annexe 6: poster (version française) réalisé pour informer les participants des ateliers sur l'utilisation de leur travail _____	189

Introduction générale

Au risque de m'éloigner légèrement du thème principal de cette thèse, j'ai choisi de préciser dans un premier temps comment je conçois le travail que j'ai réalisé par rapport à certains courants de pensée concernant le développement et l'Afrique. Durant ces trois années, il m'est en effet apparu de façon évidente que beaucoup de chercheurs africanistes (cela pourrait s'appliquer également aux ONG et aux organismes internationaux), s'ils ont une méthode de travail relativement commune, ont des points de vue opposés quant à l'avenir de l'Afrique subsaharienne et au rôle du développement. Il me paraissait donc important, avant toute chose, de préciser ma vision des choses.

Les indices de la "tragédie nègre"

J'ai pu rassembler durant cette thèse un nombre impressionnant de chiffres et d'indicateurs parfois utilisés pour démontrer la situation jugée catastrophique de l'Afrique, dénommée par certains la "tragédie nègre" (Severino et Ray (2010)). Parmi les indices les plus souvent cités et rangeant systématiquement les pays d'Afrique parmi les plus mauvais élèves de la planète se trouvent notamment le Produit Intérieur Brut, l'Indice de Développement Humain, le taux de croissance comparé au taux de fécondité, le nombre de malades atteints du VIH/SIDA, le nombre de personnes vivant avec moins d'un dollar par jour... Plus spécifiquement, dans le domaine de l'agriculture et de la sécurité alimentaire, les chiffres se concentrent généralement sur le taux de malnutrition infantile, les faibles rendements moyens comparés aux rendements asiatiques et le nombre de calories/personnes, entre autres. Je donne ici quelques valeurs de ces indices (Tableau 1 et Figure 1) à titre seulement indicatif. Ce ne sont en effet pas les chiffres pour eux-mêmes qui sont réellement intéressants, bien qu'ils traduisent une certaine réalité, mais l'effet qu'ils produisent chez le lecteur de ce genre d'ouvrage. Même si l'emploi de ce genre de statistiques est fait à bon escient - démontrer la nécessité de ne pas délaissier une région du monde dans une situation particulière - il n'en reste pas moins que leur profusion peut créer deux effets principaux. Tout d'abord, un désintérêt pour ce qu'indique le chiffre en lui-même, puisqu'il intervient souvent dans une série de valeurs toutes plus négatives les unes que les autres. De plus, et surtout, cela génère une conception négative qui entoure l'Afrique, et qui finit par s'imprimer durablement dans les esprits: l'afropessimisme (Courade (2003)).

Paramètres	Valeur pour l'Afrique subsaharienne	Valeur pour le monde
PNB/tête en 2004 (\$) (Hugon (2006))	700	4200
Taux annuel de croissance du PIB (1990/1998) (%) (Hugon (2006))	2.5	3.1
Taux de croissance de la pop. (1960/1990) (%) (Hugon (2006))	2.8	1.7
Personnes porteuses du VIH en 2007 (millions) (ONUSIDA (2008))	22.5	33.2

Tableau 1: Indicateurs macro-économiques et de santé pour l'Afrique subsaharienne et le monde

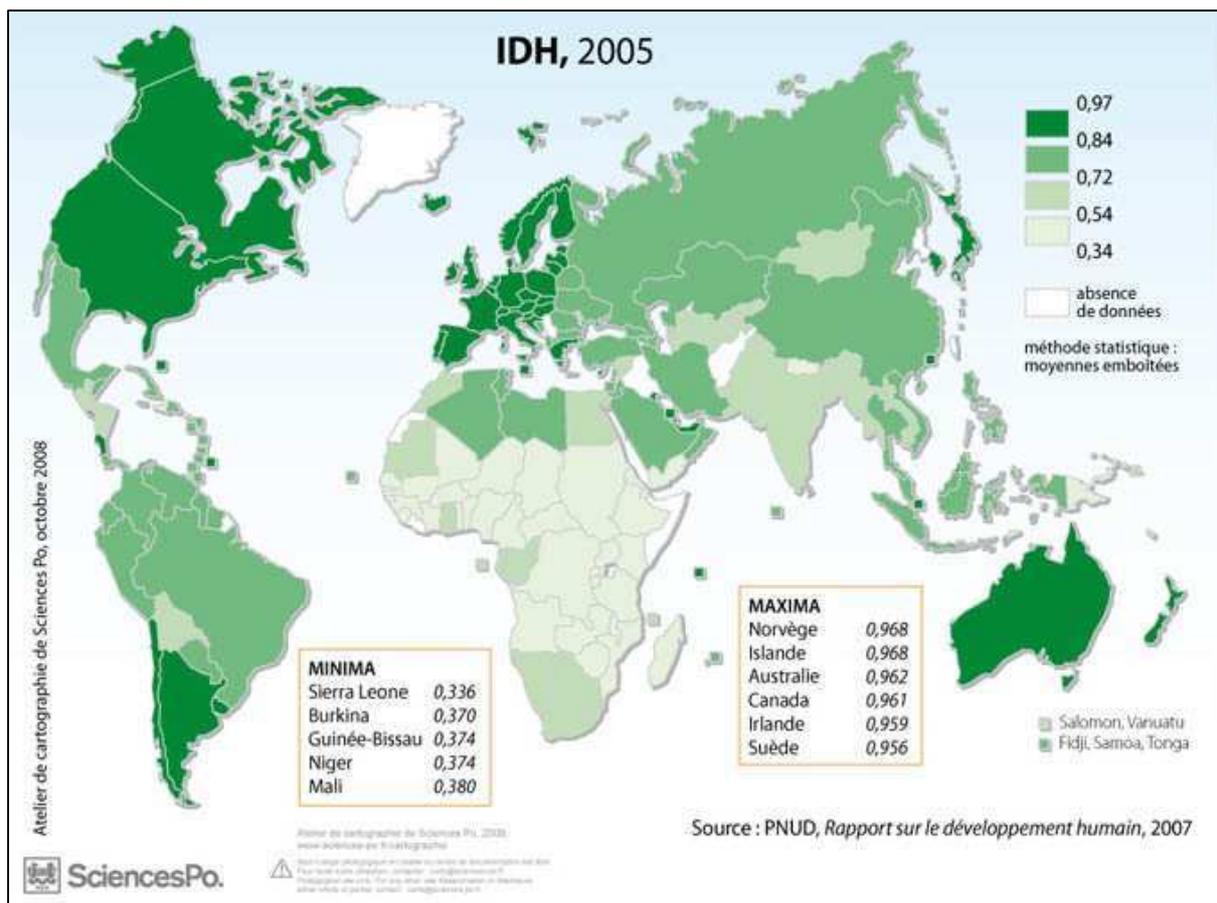


Figure 1: valeur de l'Indice de Développement Humain dans le monde en 2005 (réalisation: atelier de cartographie de Sciences Po, données du Programme des Nations Unies pour le Développement)

Une vision afro-pessimiste généralisée

Cet afro-pessimisme paraît en premier lieu ne pas être récent puisque déjà en 1962, René Dumont publiait "L'Afrique Noire est mal partie" (Editions du Seuil). Cependant, cet ouvrage ne cherche pas à démontrer un fatalisme quelconque (le deuxième thème s'intitule d'ailleurs "Elle pourrait cependant se développer rapidement") mais suggère simplement que les pays africains font fausse route en imitant le modèle agricole occidental. Cette conception de Dumont, qui fit grand bruit au moment de l'euphorie des indépendances est ainsi différente de l'afro-pessimisme actuel, qui se fonde sur d'autres arguments et qui est beaucoup plus généralisé. On le retrouve notamment dans la littérature scientifique et certains rapports¹, où évoquer un phénomène positif en Afrique est presque proscrit, mais aussi et surtout dans les médias grand public où l'Afrique est fréquemment associée aux mêmes maux qu'à l'époque de Malthus (Hugon (2006)): famines, guerres et épidémies. On peut même voir des manifestations culturelles plutôt pro-africaines (par exemple La Nuit Africaine, le 15 janvier 2011) être associées implicitement à une de ces références négatives: ainsi, l'affiche de ce concert² représente une terre craquelée par la sécheresse, même si globalement le continent a d'importantes ressources en eau (Vörösmarty *et al.* (2005)). Cette vision pessimiste actuelle mène certains, même africains (E. Leroueil, Terangaweb, 25 mars 2011³), à une sorte de fatalisme vis-à-vis de ce continent. Pour diverses raisons (*e.g.* géographiques, culturelles), les

¹ voir par exemple le World Development Report 2010 (p.5) qui ne présente dans ses cartes d'évolution des rendements futurs que la plus pessimiste des deux hypothèses, disponibles dans les documents sources.

² <http://www.artistikrezo.com/actualites/Musique/nuit-africaine-stade-de-france.html>

³ http://terangaweb.com/terangaweb_new/2011/03/25/deconstruire-les-discours-de-lafr-pessimisme-et-de-lafr-optimisme-2/

Africains seraient condamnés à rester dans un état de pauvreté chronique. Cet afro-pessimisme peut entraîner, entre autres, une conception du développement à tendance paternaliste de la part des pays du Nord, reproduisant ainsi, malgré de bonnes intentions, un schéma proche du colonialisme. Notons que si cet afro-pessimisme se fonde sur des données que l'on peut juger comme assez fiables puisqu'émanant des institutions internationales, certains chercheurs - en adoptant d'autres méthodes de calcul - ont montré que la situation n'était pas si catastrophique que cela. Par exemple, van Wesenbeeck *et al.* (2009) trouvent en Afrique un nombre de calories disponibles par personne plus élevé que la valeur rapportée par l'organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, en anglais). De même, Pinkovskiy et Sala-i-Martin (2010) montrent que les taux de croissance en Afrique sont beaucoup plus élevés que ce qui est couramment cité et que, si la tendance observée continue, de nombreux pays africains atteindront certains objectifs du millénaire pour le développement.

Ainsi, et comme le lecteur l'aura sûrement compris, je ne conçois clairement pas⁴ les travaux présentés par la suite comme faisant partie d'une vision paternaliste et pessimiste. Mon but n'est radicalement pas d'apporter la bonne nouvelle du développement à des peuples incapables de la trouver par eux-mêmes. Cependant, réfuter *l'afro-pessimisme* est-il forcément synonyme *d'afro-optimisme*?

Un afro-optimisme exagéré?

Cette question est importante au moment où cette seconde mouvance, apparemment opposée à la première, commence à émerger, par un effet de balancier assez classique. Pour certains en effet, l'Afrique, forte de nombreux atouts comme sa démographie, ses ressources naturelles et son potentiel agricole est de façon presque évidente le continent phare du XXI^e siècle. Cette possibilité commence ainsi à poindre depuis quelques temps aussi bien chez certains universitaires⁵ que dans certains organes de vulgarisation⁶. Si certaines des raisons avancées pour justifier ce décollage potentiel me semblent tout à fait valables, ce discours est parfois perçu comme superficiel et véhiculé par des puissances extérieures pour renforcer la confiance des investisseurs et ainsi conquérir un des derniers marchés de la planète (E. Leroueil, Terangaweb, 25 mars 2011; Axelle Kabou, La cause du Peuple, octobre 2011⁷). De plus et surtout, cette vision est parfois poussée à l'excès jusqu'à devenir idéaliste et peut occulter les problèmes existants spécifiques au continent et ainsi manquer les objectifs ciblés. Par exemple, si l'Afrique dispose en effet d'un formidable potentiel agricole, cela ne signifie pas forcément qu'elle va en profiter dans le futur, car certains obstacles se dressent sur le chemin de la réussite (par exemple le changement climatique). Si ceux-ci ne sont pas insurmontables, il faut néanmoins en être conscient et éviter un aveuglement dû à un excès d'optimisme.

L'Afrique, un continent en réserve de développement (Brunel (2003))

De ce fait, si ce travail ne s'inclut clairement pas dans une logique *afro-pessimiste*, il n'est pas non plus radicalement *optimiste*. Dans une approche similaire à celle de Brunel (2003), il est certain pour moi qu'il n'y pas de "tragédie nègre" immuable, mais cela ne signifie pas non plus que l'Afrique est nécessairement aux portes d'un âge d'or promis par un modèle de développement similaire aux pays occidentaux. Ses nombreux atouts en font un "continent en réserve de développement" (Brunel (2003)) et se doivent d'être magnifiés par des politiques adaptées et par les choix des Africains, qui

⁴ Koundouno, JT., Roudier, P. Etonnante Afrique: l'optimisme au-delà des préjugés. Rue89 (en ligne), 2008

⁵ <http://www.lesafriques.com/economie-politique/eric-nguyen-le-xxieme-siecle-devrait-etre-africain-2.html?Itemid=308?articleid=26665>

⁶ voir par exemple *Le Monde* du 15 septembre 2010, *The Globe and Mail*, 10 mai 2010

⁷ <http://www.mpodoleditions.fr/journal/index.php?post/2011/10/L%E2%80%99Afrique-du-XXIe-si%C3%A8cle-%3A-une-conversation-de-bistrot-R%C3%A9g%C3%A9n%C3%A9scence-du-monde-et-renaissance-africaine>

permettront de surmonter les obstacles. Si c'est à eux qu'il appartient de choisir la trajectoire future, cela se fera nécessairement en relation avec le reste du monde: c'est là que les acteurs du développement peuvent intervenir. C'est pour cela que je conçois les thématiques étudiées dans le reste de cette thèse et les modestes solutions évaluées non pas comme une aide d'un adulte vers un enfant mais comme des propositions, des outils à mettre à la disposition des Africains qui les utiliseront si bon leur semble afin de relever les défis du futur.

L'agriculture comme levier du développement africain

Je m'intéresse pour ma part spécialement à l'un de ces défis, l'agriculture. Ce choix me paraît pertinent à plus d'un terme. En effet, si les états africains ont tendu dans les années 80 et 90 à délaissier les politiques de développement agricole local, ce qui a été illustré notamment par une baisse des investissements publics dans le secteur de la recherche en agronomie (Beintema et Stads (2004)), la souveraineté alimentaire a été remise au cœur du débat dans ce début de siècle, émaillé de crises sévères comme celle de 2008 ou plus récemment de 2011 en Afrique de l'Est. En 2008 en effet, nombre d'états africains, à qui les organisations internationales suggéraient depuis longtemps d'acheter des denrée alimentaires sur les marchés internationaux plutôt que de les produire, se sont trouvés en difficulté lorsque l'offre au niveau mondial ne fut pas suffisante (Severino et Ray (2010)). Dès lors, développer l'agriculture africaine est redevenu une priorité en ce début de XXIe siècle comme le souligne par exemple l'engagement des états africains au sommet de Maputo en 2003 d'affecter 10% de leurs budgets nationaux à l'agriculture et au développement rural en cinq ans (Fall *et al.* (2009)) ou la déclaration du Nouveau partenariat pour le développement de l'Afrique (NEPAD) qui proclame que "l'amélioration de la performance agricole est une condition préalable au développement économique du continent" (Hugon (2002)). Si ces déclarations d'intérêt de grands organismes peuvent parfois laisser incrédules, il n'en reste pas moins qu'elles marquent un retour de l'agriculture et de sa production au niveau local au centre des préoccupations du développement. Son rôle primordial dans la réduction de la pauvreté est de plus souligné par plusieurs études académiques comme Christiaensen *et al.* (2011) et il est clair que sa part relative dans l'économie africaine est prépondérante (environ 30% du PIB et 70% des emplois).

L'augmentation des rendements agricoles, un objectif du développement

Dès lors, comment l'agriculture africaine doit-elle se développer? L'une des préoccupations majeures concernant ce secteur est la croissance de la production agricole au regard de la croissance démographique. La population africaine croît en effet à un rythme soutenu et les projections pour le siècle à venir prévoient son doublement (Organisation des Nations Unies (2007)) pour atteindre près de deux milliards d'individus en 2050. Les besoins alimentaires seront quant à eux multipliés par cinq en 2050, sous l'effet combiné de la croissance de la population, de sa modification et du changement de régime alimentaire (Collomb (1999)). On comprend donc le besoin pour l'agriculture africaine d'augmenter sa production: cela pourrait être réalisé via un accroissement de la surface cultivée ou par une augmentation des rendements. La seconde option paraît cependant plus adéquate dans le contexte actuel.

En effet, en premier lieu, les superficies cultivées ont connu une augmentation importante dans le passé afin d'accroître la production, ce qui laisse désormais une marge de manœuvre plus limitée (Breisinger *et al.* (2011)). Si des terres cultivables existent encore en nombre important (notamment en Afrique de l'Est), elles ne seront pas forcément toutes disponibles dans le futur pour nourrir la population africaine, étant donné le phénomène récent d'accaparement des terres par des groupes privés ou des Etats non-africains (voir par exemple Brondeau (2011) pour le Mali). Ainsi, "entre 2004 et 2008, plus de 2.5 millions d'hectares de terres ont [...] été alloués par les gouvernements d'Ethiopie, du Ghana, du Mali, du Mozambique, du Soudan, de la Tanzanie et de Madagascar" (Severino et Ray (2010)). De plus, l'extension abusive des terres cultivées entraîne une pression importante sur l'environnement avec notamment une baisse de la biodiversité, une

augmentation du ruissellement, et une perte de stockage de carbone, émis sous forme de CO₂ lorsqu'il y a déforestation. Cela peut également avoir un effet sur la fertilité des sols quand l'extension des terres est réalisée via l'arrêt des jachères.

En deuxième lieu, il y a une marge de progression considérable pour l'augmentation des rendements agricoles africains. Comme cela est souvent souligné, l'Afrique n'a pas connu comme l'Asie de révolution verte, c'est-à-dire d'augmentation importante des rendements agricoles via l'utilisation de l'irrigation et une forte intensification (apports d'engrais, de produits phytosanitaires, de machines). Cela signifie-t-il cependant que le futur de l'Afrique passe forcément par une révolution intensive de ce type? Si certains y voient un passage obligé, d'autres estiment que si l'Afrique doit bien augmenter ses rendements, sa révolution doit être "doublement verte" (Griffon (2006)), c'est-à-dire qu'elle doit se fonder non pas sur une utilisation massive et irraisonnée de l'irrigation (risque de salinisation des sols) et d'intrants chimiques (risque de pollution des aquifères) mais sur des techniques d'agro-écologie, plus respectueuses de l'environnement. Sur un autre plan, Van der Zaag (2010) souligne que la révolution verte africaine ne doit pas copier sa voisine asiatique avec par exemple une irrigation généralisée, mais doit se faire au niveau local ("local-specific") en valorisant et développant les techniques et connaissances des agriculteurs locaux ("Knowledge-intensive"), via notamment des activités de formation. Ces points de vue commencent d'ailleurs à trouver un écho dans les milieux des bailleurs de fonds internationaux. Ainsi, Warren Buffet a déclaré en octobre 2011 qu' "Une 'Révolution verte' ne fonctionnera pas véritablement pour la plupart des agriculteurs africains", en précisant que les Organismes Génétiquement Modifiés et "autres méthodes agricoles de haute technologie utilisées aux Etats-Unis ne sont peut-être pas forcément utiles aux petits agriculteurs d'Afrique subsaharienne"⁸. On voit donc finalement qu'il est nécessaire d'augmenter les rendements en Afrique, mais pas en imitant simplement le développement agricole mené dans les pays occidentaux et émergents.

L'agriculture africaine serait-elle bloquée par de trop nombreux verrous?

L'augmentation des rendements agricoles n'est cependant pas une tâche aisée car ceux-ci sont soumis à de nombreux paramètres qui peuvent agir sur leurs variations. Ainsi, Hugon (2002) souligne que "Les facteurs de blocage de l'agriculture interviennent différemment selon les systèmes de production: les distorsions de politiques, les prix défavorables, l'émigration rurale, le faible montant des investissements publics, les difficultés de commercialisation et d'approvisionnement, les technologies vétustes ou inadaptées, les facteurs climatiques (ex.: sécheresse), écologiques (désertification), sociaux (structures foncières ou lignagères) ou politiques (ex.: guerre et insécurité) sont autant d'éléments [qui entrent en compte]". Cependant, si les obstacles sont nombreux et si les rendements ont augmenté beaucoup plus faiblement que dans le reste du monde, je ne peux souscrire à un certain fatalisme (le même que pour l'économie d'ailleurs) qui tend à souligner que si les rendements ont si peu évolué dans les cinquante dernières années, cela va nécessairement continuer dans le futur, ce qui ne permettra jamais à l'Afrique d'assurer sa sécurité alimentaire. Il faut en effet être conscient que l'agriculture africaine possède un nombre importants d'atouts que les autres continents ont en partie perdu, comme l'importance de sa diversité génétique ou la qualité sanitaire et organoleptique de ses produits (Seck et Ba (2002)). Si la vision du paysan africain réfractaire à l'innovation est également courante, la littérature scientifique aussi bien que les missions sur le terrain montrent bien le contraire. D'une part, les agriculteurs sont ouverts à de nouvelles connaissances comme les prévisions météorologiques (Ingram *et al.* (2002)), d'autre part ils innovent par eux-mêmes et mettent par exemple en place des techniques de restauration de la fertilité du sol et de conservation de l'eau comme le *zai* au Burkina Faso (Jouve (2010)). Ce cas n'est pas isolé et les lecteurs assidus de *Jeune Afrique* pourront témoigner de la présence régulière d'innovations de ce genre, à l'échelle locale sur le continent africain. Enfin, si une certaine pensée malthusienne voit dans la croissance démographique un péril, certains économistes (*e.g.* Ester

⁸ http://www.agrobiosciences.org/article.php3?id_article=3225

Boserup) prétendent que l'augmentation de la densité de population est un des moteurs fondamentaux de l'innovation, du développement agricole et donc de l'augmentation des rendements. On voit ainsi clairement que "l'agriculture africaine n'est pas condamnée" (Seck et Ba (2002)), mais qu'elle doit faire face à certains défis.

On peut donc essayer d'améliorer la productivité agricole en Afrique en jouant sur les différents leviers décrits par Hugon (2002). Pratiquement, certains étudient par exemple la fertilité des sols (Bationo *et al.* (1998)), l'impact de la variation des prix (Gérard *et al.* (2011)), l'intérêt de la mise en place de système assurantiel (Berg *et al.* (2009)) ou encore le rôle du climat (Sultan *et al.* (2005)): cette thèse se consacrera à ce dernier problème spécifiquement et pour l'agriculture pluviale, qui est la plus soumise aux aléas du climat.

L'Afrique de l'Ouest, une zone pertinente pour l'étude du climat et de l'agriculture

Même si ce n'est clairement que l'un des facteurs influençant les rendements, la part du climat dans l'agriculture familiale pluviale est relativement importante: Mertz *et al.* (2010) montrent par exemple en se fondant sur des études par questionnaires dans toute l'Afrique de l'Ouest que, selon les agriculteurs, les facteurs climatiques jouent entre 30 et 50% dans les variations de ce type de production agricole. Pour mieux cerner le problème encore, je m'intéresse spécifiquement à la situation en Afrique de l'Ouest, dans la zone sahélienne et soudano-sahélienne afin de ne pas étudier dans le même temps des situations trop contrastées (par exemple, l'Afrique de l'Est connaît deux saisons des pluies contre une seule pour notre zone d'étude et les projections climatiques futures y sont différentes). Le choix d'étudier le rôle du climat en Afrique de l'Ouest est pertinent à plus d'un titre: c'est tout d'abord un des foyers de population majeurs du continent⁹ et la zone de culture principale des céréales et tubercules (53% en superficie, données FAOSTAT). De plus, le climat en Afrique de l'Ouest a connu par le passé des variations sans précédent qui ont eu des conséquences importantes sur la sécurité alimentaire. Les mécanismes ayant abouti à ces variations climatiques ont été étudiés dans les dernières années de façon approfondie avec des programmes internationaux comme AMMA (Analyse Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) et sont désormais mieux compris, ce qui permet le développement d'études sur l'impact du climat dans la sous-région. Cependant, la récente augmentation de ce type d'études a également produit une profusion d'informations qu'il est parfois difficile de résumer.

Lien entre climat et agriculture: de la nécessité d'utiliser un vaste panel d'études, de scénarii et de types de cultures

Ainsi, si le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du climat (IPCC, son acronyme anglais) parvient de façon pertinente à synthétiser ces informations, une controverse est apparue¹⁰ au sujet du résumé pour les décideurs de ce même rapport dans lequel il est indiqué qu'il pourrait y avoir dans certaines zones d'Afrique des baisses de rendements agricoles allant jusqu'à -50% en 2020. Si ce chiffre provient bel et bien d'une étude, il ne représente qu'une possibilité parmi tant d'autres, comme je le montre dans le chapitre 2. Cela peut donc poser un problème de voir cette valeur de -50% mise en exergue dans le résumé pour les décideurs, d'autant plus que l'étude de laquelle elle provient fait partie de la littérature grise (et n'est donc pas soumise à la relecture des pairs). Pour cette raison, j'ai essayé dans le chapitre 2 de cette thèse de rassembler un maximum d'études concernant le climat ouest-africain et son lien avec les rendements agricoles afin de ne pas fonder mes conclusions sur une ou deux études mais sur une base la plus large possible. J'ai réalisé ce travail en premier lieu pour la description du changement climatique dans la sous-région, en mettant un accent un peu plus prononcé sur les perceptions des locaux. Cette

⁹ http://www.oecd.org/document/19/0,3343,en_38233741_38246806_38283987_1_1_1_1,00.html.

¹⁰ <http://www.foxnews.com/scitech/2010/02/08/british-scientist-says-panel-losing-credibility/>

thématique est assez récente mais n'en reste pas moins fondamentale pour recadrer parfois la recherche scientifique sur des points spécifiques auxquels nous ne pensons pas forcément. Dans un deuxième temps, j'ai décrit de façon approfondie le futur potentiel des rendements agricoles en Afrique de l'Ouest. Cela ne se résume pas seulement à donner les valeurs trouvées dans la littérature: cela permet également de comprendre les facteurs qui influencent les rendements futurs et les différences de résultats d'une étude à l'autre.

La revue de ces études d'impact permet également de souligner certaines lacunes qu'il faut combler pour mieux appréhender les incertitudes concernant les effets du changement climatique sur l'agriculture. Ainsi, dans la continuité de ce travail, j'élabore une étude d'impact sur les rendements agricoles ([chapitre 3](#)), en adoptant une approche légèrement différente du reste de la littérature, et en me plaçant dans le prolongement de certains commentaires du chapitre 2. Afin de ne pas restreindre l'ensemble des possibles, j'étudie en effet un grand nombre de scénarii climatiques fondés sur une large gamme d'anomalies de pluies et de températures. Pour chacun de ces scénarii, je quantifie les effets sur les rendements du sorgho et du mil en employant un modèle agronomique spécialement conçu pour ce type de culture en milieu tropical, ce qui n'est pas toujours le cas des travaux cités dans la revue. Pour chaque culture, j'ai retenu trois variétés différentes aux caractéristiques contrastées. Notamment, chacune des trois variétés est plus ou moins sensible à la photopériode: ce paramètre qui n'a jamais été pris en compte dans les études d'impact du climat futur est néanmoins une des caractéristiques fondamentales des céréales ouest-africaines. Les différents résultats entre les variétés peuvent ainsi donner des pistes sur les types de variétés qui seraient plutôt préférables dans le futur.

Les chapitres 2 et 3 forment en quelque sorte une constatation sur le rôle d'un facteur parmi d'autres, le climat, sur les rendements agricoles futurs en Afrique de l'Ouest. Conjointement, rappelons-nous qu'il avait semblé nécessaire d'augmenter les rendements dans la sous-région afin de pouvoir nourrir une population croissante et de limiter l'extension des terres cultivées. J'essaye donc par la suite de trouver un moyen (par exemple une technique culturale ou une information) qui permette d'augmenter ces rendements.

Les prévisions saisonnières: un outil prometteur

Cette stratégie se doit de respecter un certain nombre de conditions déjà énoncées: il serait préférable qu'elle s'inscrive dans un concept de "révolution doublement verte" (*i.e.* qu'elle ne soit pas uniquement fondée sur un usage massif d'intrants), qu'elle soit "*knowledge-intensive*" (*i.e.* qu'elle se fonde notamment sur des activités de formation au niveau local) et qu'elle ait toujours un intérêt dans un contexte de climat changeant et incertain. Le récent rapport d'étape de l'IPCC sur les événements extrêmes (IPCC (2011)) définit pour la sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest six stratégies dites du moindre regret qui peuvent potentiellement réduire l'exposition et la vulnérabilité aux aléas. Parmi ces stratégies, on trouve "l'utilisation de systèmes d'alerte précoce employant des prévisions saisonnières". L'alerte précoce a pour but d'anticiper les situations de crises alimentaires en se fondant sur l'observation de la situation et sur les prédictions de pluie pour les mois à venir. Cela permet notamment de mobiliser par avance des fonds et de préparer plus efficacement une aide d'urgence. Cette stratégie est donc en-dehors de notre recherche puisqu'elle ne permet pas d'augmenter les rendements mais de répondre ponctuellement à une situation de crise.

En revanche, ces mêmes prévisions saisonnières peuvent être employées pour permettre aux agriculteurs d'adapter leurs choix à la tendance pluviométrique de la saison à venir. De telles prévisions sont diffusées en Afrique de l'Ouest depuis 1998 via le programme PRESAO (PREvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest) et certains programmes pilotes (Hellmuth *et al.* (2007)) ont montré un intérêt important pour la sécurité alimentaire des agriculteurs. L'utilisation des prévisions saisonnières semble ainsi typiquement s'inscrire dans une logique *knowledge-intensive* puisqu'elles apportent des informations complémentaires aux agriculteurs. Si ceux-ci ont déjà certains moyens de prévisions, Ingram *et al.* (2002) ont par exemple montré que les exploitants étaient effectivement intéressés par des prévisions scientifiques. Notons que pour moi, il ne s'agit pas ici de vouloir

remplacer les connaissances locales par ces prévisions fondées sur les modèles climatiques, mais d'essayer de les enrichir mutuellement. Cette intégration des deux types de savoir a d'ailleurs été mis en place récemment (Ziervogel et Opere (2010)), avec des résultats prometteurs.

Estimer la valeur des prévisions saisonnières au Niger pour prouver leur utilité

Je m'intéresse donc dans le chapitre 4 aux prévisions saisonnières pour les agriculteurs. On peut se consacrer à cette thématique de différentes manières; je choisis pour ma part d'étudier dans un premier temps la valeur potentielle de cette information pour les cultivateurs de mil au Niger, via une étude *ex ante*, c'est-à-dire qui évalue l'information avant qu'elle ait été diffusée et utilisée réellement *in situ*. Démontrer l'utilité (ou pas) de ce type d'information est un point fondamental (Sivakumar et Hansen (2007)) pour que les programmes de prévisions saisonnières puissent continuer et pour qu'il y ait une meilleure adéquation entre les produits de prévision météorologique et les besoins des acteurs du secteur agricole. De plus, il n'y a pas encore, à ma connaissance, d'étude quantifiant le bénéfice de ce type d'information en Afrique de l'Ouest pour des cultures vivrières. Celles-ci ont en effet une valeur marchande plus faible que les cultures de rente et disposent généralement de moins d'intrants, ce qui rend la réaction potentielle à la prévision plus marginale. Le choix d'une étude *ex ante* permet d'une part de simuler la valeur de l'information sur un grand nombre d'années contrastées mais également de tester la pertinence de nouveaux indices climatiques. J'élabore donc dans ce chapitre 4 un modèle économique théorique tenant compte de l'aversion au risque des agriculteurs sahéliens afin de quantifier la valeur d'une prévision saisonnière classique du cumul pluviométrique mais également de nouveaux indices comme les dates de début et de fin de saison.

Des ateliers participatifs pour mieux comprendre et quantifier l'utilisation des prévisions

Ce type d'étude est cependant fondé sur un nombre important d'hypothèses (*e.g.* tous les agriculteurs utilisent la prévision) et ne tient pas compte de la diversité des comportements au sein d'un même village, ce qui peut entraîner un biais dans les résultats. Ainsi, il est fondamental de compléter les résultats théoriques par une partie plus pratique qui me confronte à la réalité du terrain, et également aux commentaires des agriculteurs "en direct". Une étude *ex post*¹¹ est cependant difficile à réaliser dans le cadre de cette thèse, notamment à cause de son coût et du temps nécessaire pour avoir des résultats robustes. Pour pallier ce problème et avoir tout de même une évaluation fondée sur une expérience réelle, j'ai élaboré des ateliers participatifs dans deux villages sénégalais (chapitre 5). Ces ateliers ont pour but, en se fondant sur des prévisions avec une précision proche de celles réellement produites par les services météorologiques nationaux, d'étudier les changements de pratiques culturelles induits par les prévisions saisonnières et les prévisions décennales (par exemple, changement de: variétés employées, date de semis, taux et date d'utilisation des engrais). Afin d'avoir une analyse fine des pratiques culturelles, les participants aux ateliers peuvent ainsi préciser à un pas de temps décennales les actions qu'ils mèneraient s'ils disposaient de ces deux types de prévision. Ils sont finalement amenés à la fin de chaque année jouée à évaluer leur rendement sur chaque parcelle: cela permet d'évaluer qualitativement le gain dû à ces prévisions. Ces ateliers ont donc, comme le chapitre 4, pour but de quantifier l'impact de l'introduction de prévisions climatiques. Mais ils donnent aussi et surtout la possibilité de discuter librement avec les agriculteurs de leurs besoins, de leur appréciation des prévisions et de leurs propres moyens de prévision.

¹¹ les études *ex post* étudient l'impact de la prévision après son introduction auprès des paysans, *e.g.* en mesurant chaque année les rendements de cultures dont les exploitants ont bénéficié de la prévision au début de la saison

Chapitre 1: Présentation des jeux de données utilisés et du modèle SARRA-H

Nous présentons dans ce chapitre, les jeux de données utilisés dans la thèse ainsi que le modèle SARRA-H:

- Les données historiques (non simulées) renseignant une période passée. Ce sont (i) des données pluviométriques et météorologiques à l'échelle de la station, (ii) des données pluviométriques et météorologiques interpolées (Climate Resarch Unit (CRU)), (iii) des données renseignant les pratiques agricoles des agriculteurs, (iv) des données de prix (mil et fertilisants) et (v) des données de rendements (FAO).
- Les données provenant de la modélisation climatique. Il s'agit (i) des projections pour le futur (modèles climatiques des 4e et 5e rapports de l'IPCC), (ii) des simulations utilisées pour les prévisions saisonnières provenant de l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) et (iii) des simulations utilisées pour les prévisions décadaires provenant aussi de l'ECMWF.
- Le modèle agronomique SARRA-H

1. Observations

1.1 Données pluviométriques et météorologiques à l'échelle de la station

1.1.1 Données IRD sur l'Afrique de l'Ouest (chapitre 3)

Nous utilisons ici une base de données pluviométriques et climatiques collectées par l'IRD sur l'Afrique de l'Ouest. Afin d'avoir des couvertures spatiales et temporelles suffisantes, nous avons sélectionné 35 stations météorologiques (voir Figure 2) couvrant la période 1961/1990. Pour chacune de ces stations, plusieurs variables sont disponibles au pas de temps journalier, entre autres: pluie, vent à 2m, températures moyennes, maximales et minimales, humidité relative, insolation. On a recueilli ces données sans lacunes car elles ont déjà fait l'objet d'un comblement en amont, dont on n'a pas le détail.

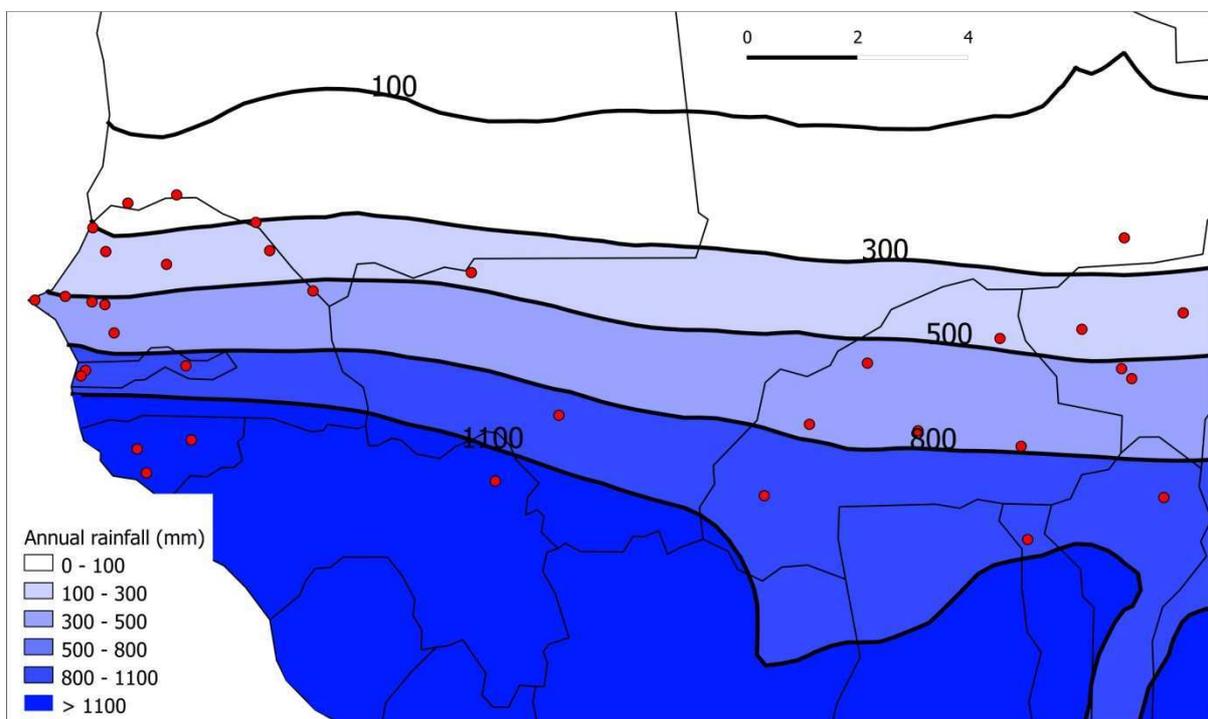


Figure 2: 35 stations météorologiques sélectionnées pour l'étude (1961/1990)

1.1.2 Données du Centre régional Aghrymet sur le Niger (chapitre 4)

Ce jeu de données, collectées par le centre régional Aghrymet à travers le programme AMMA-CATCH Niger (Cappelaere *et al.* (2009)) est constitué de 30 stations pluviométriques (1990/2007) et d'une station météorologique réparties sur une zone d'environ un degré sur un degré autour de Niamey (voir Figure 3).

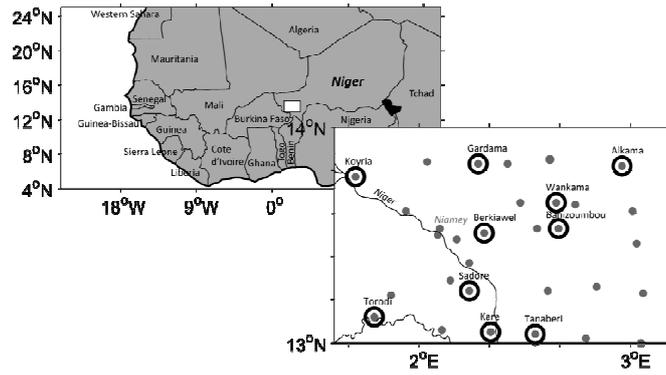


Figure 3: zone d'étude. Les points gris représentent les stations pluviométriques et les cercles noirs les villages où des suivis agronomiques sont réalisés (Marteau *et al.* (2011)).

Notons que seulement deux des 30 stations ont plus de 10% de lacunes (10.6 et 16%) ce qui est communément utilisé comme une valeur seuil acceptable (Romero *et al.* (1998)). Afin de combler les lacunes de pluie au pas de temps journalier, plusieurs méthodes sont disponibles (voir *e.g.* Coulibaly et Evora (2007), Garcia *et al.* (2006)). Dans une analyse comparative, Teegavarapu et Chandramouli (2005) en recommandent deux en particulier. Nous choisissons la plus simple d'entre elles, la méthode de pondération via le coefficient de corrélation (Coefficient of Correlation Weighting Method). La valeur manquante θ à la station m est calculée grâce à l'équation 1.

$$\theta_m = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i R_{m,i}}{\sum_{i=1}^n R_{m,i}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec R le coefficient de corrélation de Pearson entre la station m et une autre station i . n est le nombre de stations qu'on considère pour le comblement de la lacune. Comme suggéré par Teegavarapu et Chandramouli (2005) nous retenons les quatre stations ($n=4$) avec le R le plus élevé pour les années 1990/2006. En considérant toutes les stations, on obtient les valeurs de corrélation suivantes: $R_{\text{moy}}=0.83$, $R_{\text{min}}=0.61$ et $R_{\text{max}}=0.96$. On garde de plus l'année 2007 pour évaluer la performance de cette méthode en comparant les données simulées aux données observées. Le hit rate (le taux de bonne prédiction, voir Annexes, page 179) est donné dans le Tableau 2. Les pluies sont discrétisées en quatre classes et la diagonale représente le hit rate. Ainsi, il est visible que cette méthode est efficace pour les faibles pluies mais est plus problématique pour les événements $>10\text{mm}$ et $>20\text{mm}$. Cependant, les erreurs importantes (différence de plus d'une classe) restent rares.

		Données simulées			
Intervalle (mm)		[0 ; 1]	]1 ; 10]	]10 ; 20]	>20
Données obs.	[0 ; 1]	91.0	8.0	0.9	0.1
	]1 ; 10]	17.4	65.2	14.0	3.4
	]10 ; 20]	5.3	43.5	35.3	15.9
	>20	1.5	16.1	31.4	51.0

Tableau 2: évaluation de la méthode de comblement. 1990/2006 sont utilisées pour calibration, 2007 pour validation.

1.1.3 Données de l'Agence Nationale de la Météorologie Sénégalaise sur le Sénégal (chapitre 5)

Nous utilisons dans le chapitre 5 tout d'abord des données journalières de pluie pour la période 1950/2010 qui sont issues de la base de données pluviométrique ISRA-CERAAS (Institut Sénégalais pour la Recherche Agronomique-Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse) et proviennent de la station pluviométrique de l'Agence Nationale de la Météo Sénégalaise (ANAMS) de Diourbel et de la station ISRA-ANAMS de Nioro du Rip (Figure 4). Elles ont été utilisées notamment par Salack *et al.* (2011). Les données ont été fournies sans détail sur le nombre de lacunes initial ni sur les méthodes de comblement.

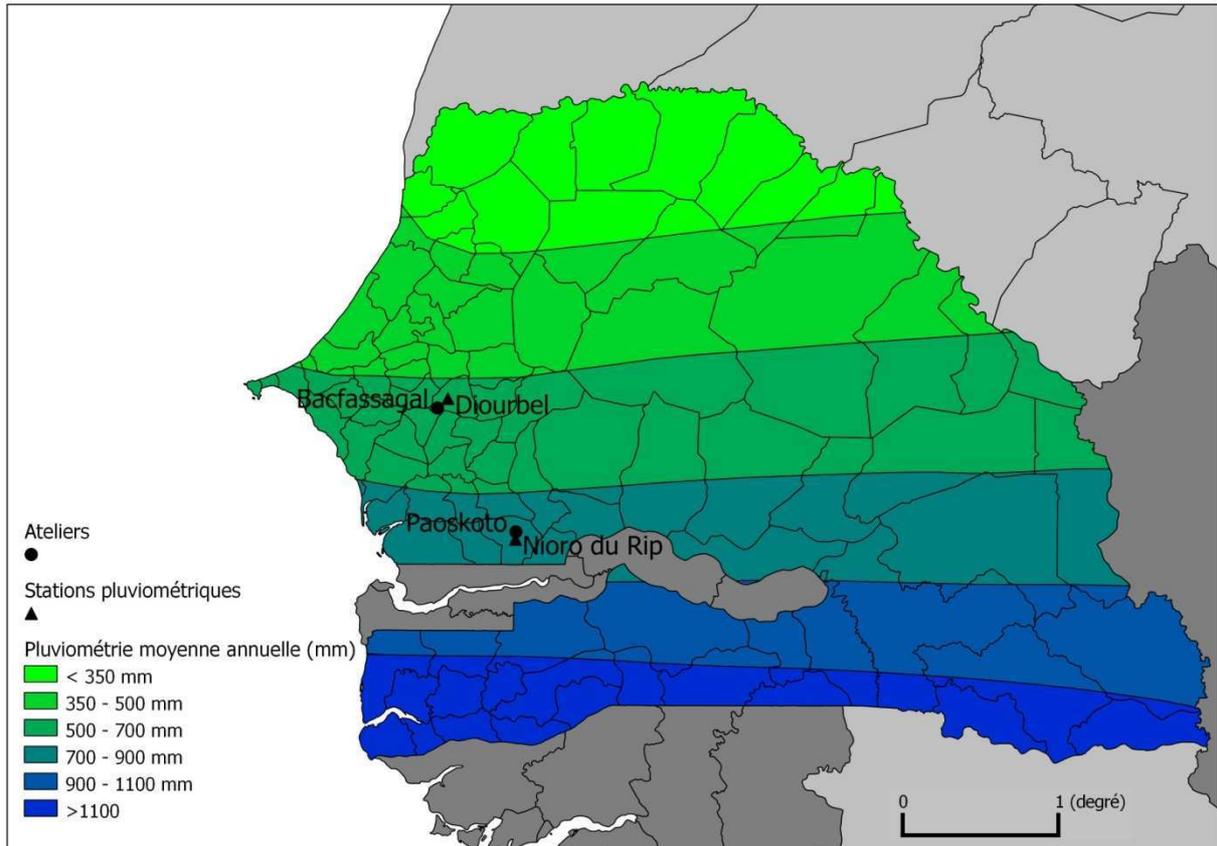


Figure 4: localisation des villages des ateliers avec la station pluviométrique de référence, données de pluviométrie issues de CRU TS 3.1 (1961/1990)

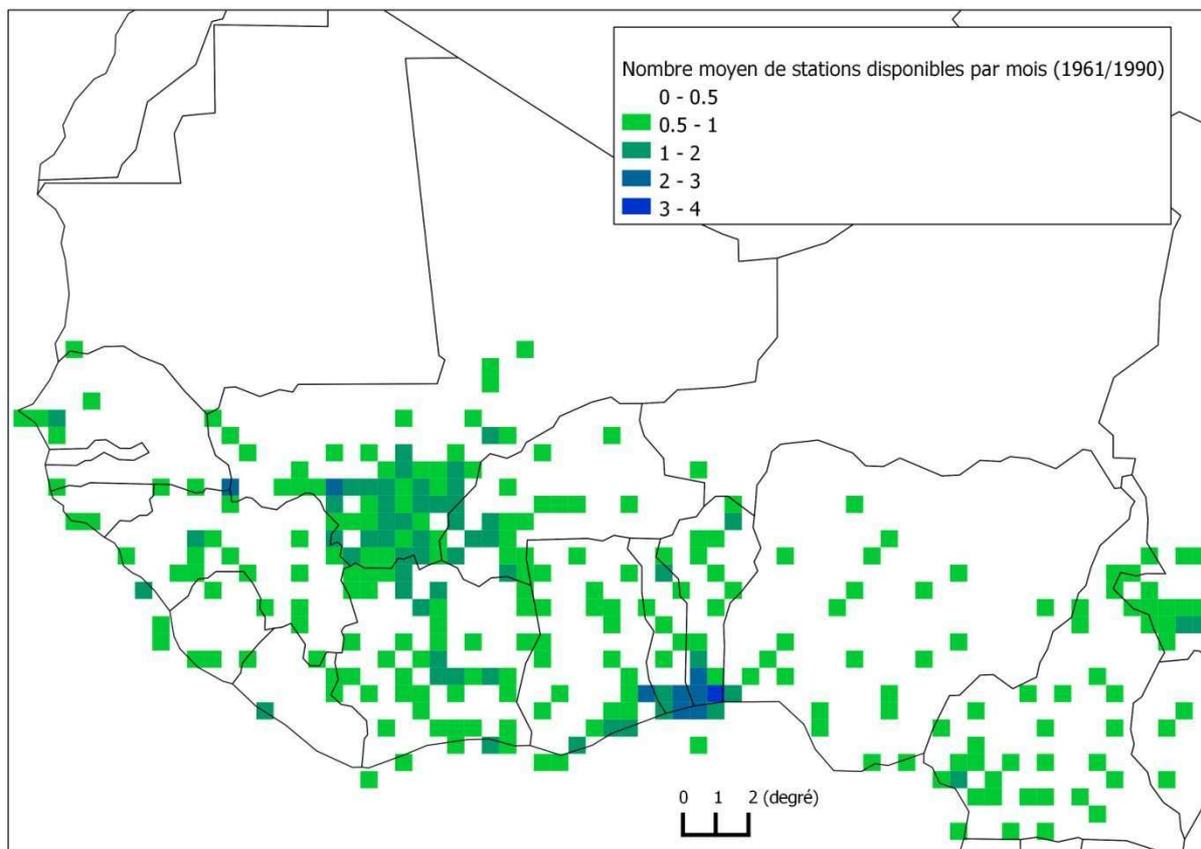
1.2 Données interpolées du Climate Research Unit (chapitre 3): pluie et température

Nous avons utilisé le jeu de données TS 3.1 du CRU¹² qui fournit sur tout le globe les pluies et températures moyennes pour les années 1901/2009, au pas de temps mensuel et à une résolution de 0.5°. Cette base de données est constituée en partant initialement d'un jeu de plus de 4000 stations couvrant le monde entier, et la valeur dans chaque pixel représente alors la moyenne des stations dans ce pixel et à proximité. La Figure 5 donne un exemple de la disponibilité des données de pluie en Afrique de l'Ouest pour la période 1961/1990. Notons que la valeur effective de pluie

¹² Climate Research Unit, voir:

http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__dataent_1256223773328276

calculée pour un pixel tient compte des stations disponibles dans un rayon de 450 km. Si pour un mois donné (e.g. juillet 1998), il n'y a aucune station disponible dans un rayon de 450 km, alors la valeur de pluie de ce mois sera la moyenne de toutes les pluies du mois juillet disponibles à ce point de grille sur la période 1961/1990.



1.3 Données agricoles issues d'essais en milieu paysan au Niger (chapitre 3 et 4)

Le centre Régional Aghrymet a collecté, conjointement aux données de pluie de la section 1.1.2, des données agronomiques décrivant les rendements et les pratiques culturales dans 10 villages (30 parcelles dans chaque village) du degré carré de Niamey et couvrant la période 2004/2008 (Alhassane (2009)). De nombreuses variables permettent de caractériser les parcelles selon:

- les itinéraires culturaux: date de semis, de récolte, culture principale (et variété), culture associée, densité de semis, type de sol, fumure et engrais chimique.
- les variables de production: rendement en grain, poids des épis, poids du grain, poids de la paille.

Cette base a permis entre autre dans le chapitre 4 de vérifier que le modèle de choix des stratégies culturales élaboré donne des résultats proche de la réalité lors de la situation de contrôle.

1.4 Données de prix (chapitre 4)

Afin de calculer les revenus des agriculteurs nous utilisons trois jeux de données de prix sur la période 1990/2007, qui est la période pour laquelle nous disposons des données de pluie que nous utilisons dans le chapitre 4.

- Le coût des fertilisants (NPK 15-15-15) au Niger fournis par la Centrale d'approvisionnement de la République du Niger, grâce à John H. Sanders (Purdue University).
- Le prix d'achat du mil (moyenne sur douze mois) à Niamey, fournies par le Système d'Information sur les Marchés Agricoles Niger (SIMA). Ce jeu n'est utilisé que pour combler les lacunes dans les données de prix de vente (voir ci-dessous).
- Le prix de vente du mil, données FAOSTAT (1991/2006). Pour combler les deux années manquantes, on effectue une régression linéaire sur les années 1991/2006 entre le prix de vente et le prix d'achat du mil ($R^2=0.68$, Figure 6) et on en déduit ainsi les prix de vente pour les années 1990 et 2007.

Afin de ne pas tenir compte de l'effet de l'inflation, on ramène tous ces prix en FCFA équivalent année 2000 en utilisant les coefficients de conversion annuels donnés par le Fonds Monétaire International (FMI).

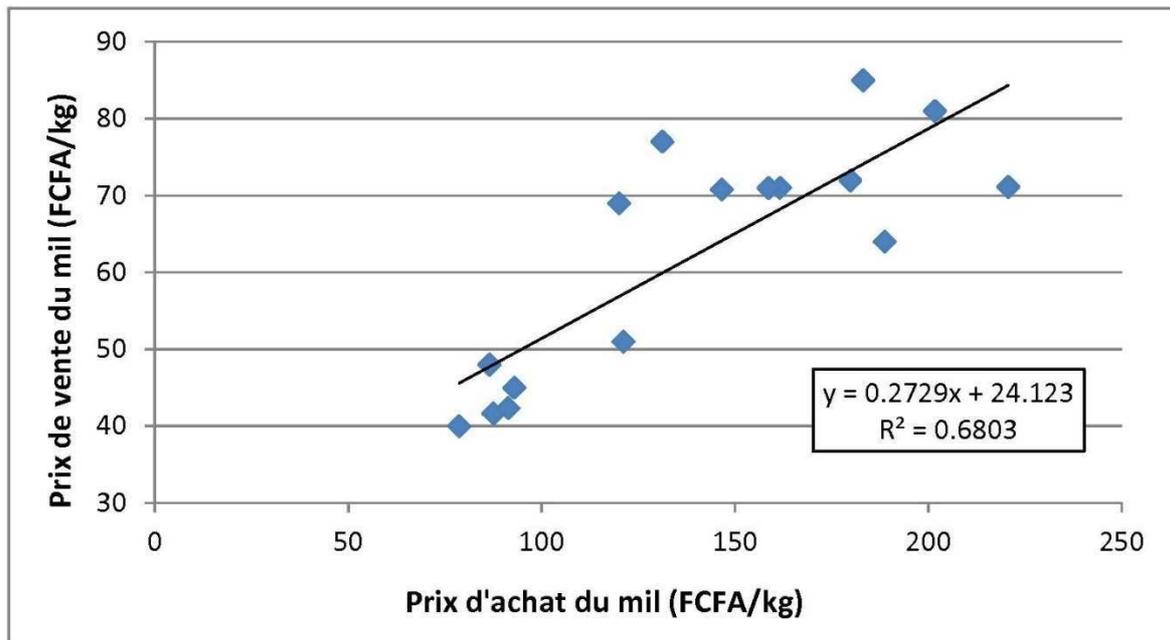


Figure 6: relation entre le prix de vente et le prix d'achat du mil au Niger, pour la période 1991/2006

1.5 Données FAO de rendement

La FAO fournit grâce à son serveur FAOSTAT des données concernant l'agriculture de tous les pays du monde. Nous nous servons ici des données de rendement pour les pays d'Afrique de l'Ouest. Il est possible d'extraire sur 1961/2009 et pour un grand nombre de cultures (utilisées ici: sorgho, mil) les données pays par pays ou en moyenne sur l'Afrique de l'Ouest: cela englobe alors tous les états membres de la CEDEAO (Communauté Economique des Etats d'Afrique de l'Ouest). Lorsque nous utilisons les données de rendements pays par pays, nous supprimons certaines valeurs de rendement lorsqu'elles sont, pour le même pays et pour des années consécutives identiques à l'hectogramme près. Par exemple, le rendement du mil en Guinée-Bissau est de 6667 hg/ha de 1961 à 1964: nous supprimons alors ces valeurs.

2. Modélisation climatique

2.1 Projections futures (chapitre 3)

2.1.1 Modèles climatiques utilisés pour le quatrième rapport de l'IPCC (AR4)

Afin d'étudier le climat futur, nous avons extrait des archives du PCMDI (Program For Climate Model Diagnosis and Intercomparison) les sorties des simulations sur les XXe (20C3M, 1961-2000) et XXIe (2001-2100) siècles de plusieurs modèles climatiques et plusieurs scénarii climatiques provenant du CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project phase 3) et utilisées pour le 4e rapport de l'IPCC (AR4). Nous utilisons ainsi le maximum de GCMs (modèles climatiques de circulation générale) et de scénarii (Tableau 3). Les détails sur les GCMs peuvent être trouvés dans l'AR4 (IPCC (2007b), pages 597 et 598). Chaque GCM peut être forcé par différentes concentrations en CO₂ calculées via trois scénarii d'émissions dits SRES¹³ (A2, A1B, B1). Dans cette thèse, nous considérons les projections journalières de pluie et de températures de mai à septembre, ce qui représente le cœur de la saison des pluies sur la zone considérée (19°O à 17°E en longitude et 2.5°N à 25°N en latitude).

Institut	Pays	GCM	Noms sur les graphes	Commentaires sur la disponibilité des données
Bjerknes Centre for Climate Research	Norvège	BCCR-BCM2.0	bc	
Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis	Canada	CGCM3.1(T47)	cc	
Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis	Canada	CGCM3.1(T63)	cc63	Scénario A2 manquant
Météo-France / Centre National de Recherches Météorologiques	France	CNRM-CM3	cn	
CSIRO Atmospheric Research	Australie	CSIRO-Mk3.0	cs0	Scénario A1B manquant pour 2031-2050
CSIRO Atmospheric Research	Australie	CSIRO-Mk3.5	cs5	
US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	GFDL-CM2.0	gf0	
US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	GFDL-CM2.1	gf1	
NASA / Goddard Institute for Space Studies	USA	GISS-AOM	gie	Scénario A2 manquant
NASA / Goddard Institute for Space Studies	USA	GISS-ER	gir	Scénario A1B manquant pour 2031-2050
LASG / Institute of Atmospheric Physics	China	FGOALS-g1.0	ia	Scénario A2 manquant

¹³ Special Report on Emission Scenarios, voir http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/
Ces scénarii décrivent différentes évolutions du monde selon des critères technologiques, démographiques et économiques et quantifient les émissions de gaz à effet de serre pour chaque scénario, tout au long du XXe siècle

Institute for Numerical Mathematics	Russie	INM-CM3.0	in	
Institut Pierre Simon Laplace	France	IPSL-CM4	ip	
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	Japon	MIROC3.2(hires)	mih	Scénario A2 manquant
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	Japon	MIROC3.2 (medres)	mim	
Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA, and Model and Data group.	Allemagne / Corée	ECHO-G	miu	
Max Planck Institute for Meteorology	Allemagne	ECHAM5/MPI-OM	mp	
Meteorological Research Institute	Japon	MRI-CGCM2.3.2	mr	
National Center for Atmospheric Research	USA	CCSM3	nc0	
National Center for Atmospheric Research	USA	PCM	nc1	Scénario A1B manquant pour 2031-2050
Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office	UK	UKMO-HadCM3	uk3	
Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office	UK	UKMO-HadGEM1	uk1	Scénario A2 et B1 manquants

Tableau 3: GCMs du CMIP3 utilisés dans cette étude et leur noms abrégés sur les graphiques.

2.1.2 Modèles climatiques utilisés pour le futur AR5

Pour le climat futur, nous avons également extrait via le KNMI Climate Explorer¹⁴ les récentes simulations des GCMs provenant du CMIP5¹⁵ et qui seront utilisés pour le prochain rapport de l'IPCC (AR5). Notons que seules les simulations de 17 modèles sur les 50 qui contribuent à CMIP5 sont disponibles à l'heure actuelle sur le site de téléchargement. Nous adoptons la même approche qu'avec les GCMs de l'AR4, en extrayant les températures et précipitations mensuelles (2,5°*2.5° de résolution spatiale), mais pour les nouveaux scénarii d'émissions, dits RCP (pour Representative Concentration Pathways): RCP 4.5, 6.0 et 8.5 (Moss *et al.* (2010)).

¹⁴ http://climexp.knmi.nl/selectfield_cmip5.cgi?id=someone@somewhere

¹⁵ <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>

GCM	Commentaires sur la disponibilité des données
bcc-csm1-1	
CanESM2	Scénario RCP 6.0 manquant
CCSM4	
CNRM-CM5	Scénario RCP 6.0 manquant
CSIRO-Mk3-6-0	
EC-Earth23	Scénario RCP 6.0 manquant
GISS-E2-R	
HadGEM2-CC	Scénario RCP 6.0 manquant
HadGEM2-ES	
inmcm4	Scénario RCP 6.0 manquant
IPSL-CM5A-LR	
MIROC-ESM	
MIROC-ESM-CHEM	
MIROC5	
MPI-ESM-LR	Scénario RCP 6.0 manquant
MRI-CGCM3	Scénario RCP 6.0 manquant
NorESM1-M	

Tableau 4: GCMs de l'AR5 utilisés dans cette étude et disponibilité des données pour chaque GCM

2.2 Prévisions saisonnières (chapitre 5)

Comme on l'a vu succinctement dans l'introduction, les prévisions saisonnières donnent avant le début de la saison pluvieuse à venir une information sur le tercile de son cumul pluviométrique (plutôt "humide", "normal" ou "sec"). L'information est souvent véhiculée sous forme probabiliste, c'est-à-dire qu'une probabilité d'occurrence est associée à chacun des trois terciles.

Afin de générer une prévision probabiliste du cumul saisonnier de pluie, nous avons utilisé une approche similaire à Batté et Déqué (2010) en utilisant les prévisions saisonnières (hindcasts) du projet ENSEMBLES, volet 2. Le multi-modèle utilisé est constitué de 45 membres (5 modèles climatiques ayant chacun fait 9 simulations en perturbant les conditions initiales pour échantillonner la variabilité interne des modèles). Nous sélectionnons pour notre étude sur la période 1960/2005 les prévisions saisonnières dont la simulation est lancée au mois de mai pour les 4 mois suivants (Juin, Juillet, Août, Septembre, noté "JJAS"). Ces données proviennent de l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) et sont disponibles pour chaque modèle à une résolution de 2.5°x2.5°. Il faut par la suite transformer pour chaque année ces données en probabilité d'avoir une saison "sèche", "normale" ou "humide"

Ces trois catégories sont créées en utilisant le jeu de réanalyses (version 4) du Global Precipitation Climatology Centre qui fournit à l'échelle du globe les pluies mensuelles sur la période 1901/2007. Ainsi pour chaque année de la période 1960/2005, on peut calculer, sur l'Afrique de l'Ouest, les valeurs-seuils des trois classes (sèche, normale et humide) en utilisant ce jeu de données. Par exemple, pour l'année 1962, ces deux valeurs seuils sont les terciles de la distribution des 45 cumuls JJAS ([1960:1961]; [1963:2005]). Afin d'obtenir une information probabiliste, on répartit suivant le cumul de pluie prévu chacun des membres du multi-modèle dans la catégorie adéquate puis en affectant à chacun un même poids, on peut alors déterminer la probabilité pour une saison des pluies d'être sèche (*i.e.* d'une pluviométrie similaire aux 15 années les plus sèches de ([1960:1961]; [1963:2005]), normale ou humide. Notons que les données du multi-modèle d'ENSEMBLES ont été au préalable corrigées via une méthode quantile-quantile de correction des biais.

2.3 Prévisions décadaires (chapitre 5)

Afin de générer une prévision décadaire de la pluie, nous utilisons les données de prévisions déterministes de la pluie à moyen terme de l'ECMWF, archivées depuis 1985 dans le système d'archivage MARS de l'ECMWF. Ces données permettent pour la période 1985/2000 et à un pas de temps sub-journalier d'avoir une prévision de la quantité de pluie prévue pour les 240 heures suivantes (*i.e.* 10 jours). On extrait donc ces données sur toute la période temporelle et pour le point de grille où se situent les villages de l'étude. On peut donc en déduire, tous les dix jours, une prévision décadaire.

3. Modélisation agronomique: le modèle SARRA-H

Le modèle agronomique SARRA-H (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques) V32 est utilisé pour simuler les rendements potentiellement atteignables sous contrainte climatique à l'échelle de la parcelle selon les paramètres des cultures et des variétés considérées. Il est particulièrement adapté pour l'analyse de l'impact du climat sur la croissance et le rendement des céréales en milieu tropical (Kouressy *et al.* (2008); Dingkuhn *et al.* (2003); Sultan *et al.* (2005); Baron *et al.* (2005)). SARRA-H est un modèle déterministe simple fonctionnant au pas de temps journalier et mis en œuvre sur la plateforme Ecotrop (<http://ecotrop.cirad.fr/>) du Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). Il a été développé à partir de SARRA, le modèle de bilan hydrique utilisé par les agronomes en Afrique de l'Ouest (Samba (1998)) pour le mil et le sorgho. Deux autres grands axes ont par la suite été pris en compte en plus du modèle de bilan hydrique SARRA pour aboutir à SARRA-H: le bilan carboné de la plante (*i.e.* photosynthèse et conversion du rayonnement en biomasse) et la phénologie de plante (*i.e.* succession des phases de croissance de la plante). Nous décrivons par la suite les concepts de base de ces trois grands axes (en s'inspirant largement des travaux de Dingkuhn *et al.* (2003), Kouressy *et al.* (2008), Traoré *et al.* (2011), Alhassane (2009), Marteau (2010)).

3.1 Un moteur phénologique: base d'évolution des processus

Le modèle considère qu'à partir du semis jusqu'à la récolte, la plante passe par différentes phases de croissance (Figure 7). Ainsi, le modèle SARRA-H définit sept grandes phases:

- Levée (phase de germination)
- BVP: phase végétative de base (phase juvénile)
- PSP: phase sensible à la photopériode
- RPR : phase reproductive
- Matu 1: phase de maturation 1 (remplissage des grains)
- Matu 2: phase de maturation 2 (dessiccation des grains)
- Récolte

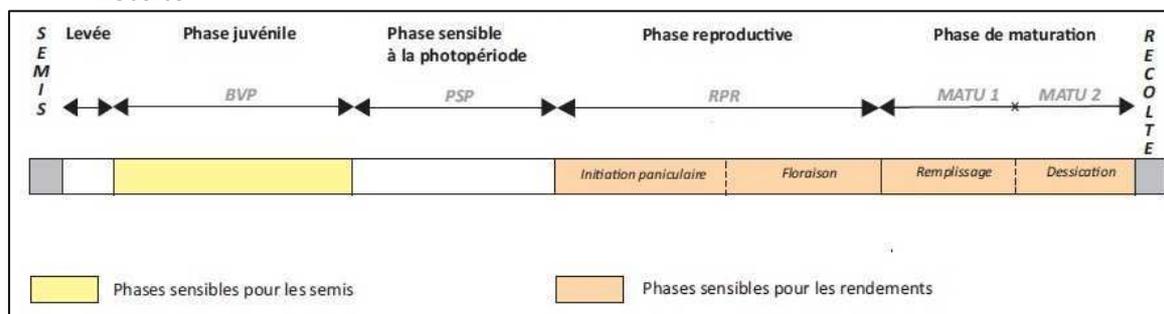


Figure 7: schématisation des phases phénologiques simulées par SARRA-H pour les céréales. La zone jaune représente la phase pendant laquelle le risque de semis raté est important et la phase rose la période de sensibilité aux sécheresses (Marteau (2010), modifié)

Toutes les phases sauf PSP, ont une longueur en temps thermique fixe, *i.e.* il faut qu'un certain nombre de degré-jours ait été accumulé. Le nombre de degrés-jour cumulé quotidiennement est fonction des températures minimales et maximales journalières ainsi que de températures caractéristiques de la plante: température de base, optimale 1, optimale 2, et létale. La longueur de ces phases dépend donc de la température. Seule la phase PSP n'est pas uniquement influencé par la température, mais également par la photopériode (qui est une fonction des coordonnées géographiques de la station et du jour de l'année). Les variétés possédant cette caractéristique sont dites photopériodiques et n'épient ainsi que si la durée journalière d'éclairement est inférieure à 12h (Vaksmann et Traoré (1994)).

3.2 Bilan hydrique: une dynamique de réservoirs

SARRA-H simule le bilan hydrique en utilisant une dynamique de réservoirs. Seuls les flux verticaux et descendants sont pris en compte. L'eau (ici les précipitations) qui ne ruisselle pas (la part ruisselée dépend des caractéristiques du sol) et qui n'est pas évaporée s'infiltré dans le sol qui est subdivisé en deux couches:

- un réservoir de surface de profondeur fixe qui se remplit en premier et de façon homogène. Il est soumis aux processus d'évaporation.
- un second réservoir dont la taille varie en fonction du front d'humectation et qui contient les racines. Le front racinaire progresse à des taux empiriques selon la phase de croissance et est limité par le front d'humectation (Traoré *et al.* (2011)). Ce réservoir est soumis aux processus de transpiration.

La transpiration et l'évaporation dépendent (i) de la demande climatique, qui est exprimée à travers l'évapotranspiration potentielle (ET_o) calculée selon la formule de Penman Monteith (Allen *et al.* (1998)), (ii) de la couverture foliaire du sol et (iii) des phases de croissance de la plante. La transpiration et l'évaporation sont limitées par l'eau disponible dans les deux réservoirs, respectivement le second et le premier réservoir. Le rapport entre la demande climatique et l'eau effectivement disponible permet de définir un indice de satisfaction des besoins en eau qui joue dans la création de biomasse.

3.3 Bilan carboné: une dynamique de la biomasse

Les taux potentiels d'assimilation du carbone sont obtenus en multipliant le rayonnement photosynthétiquement actif (calculé par la loi de Beer-Lambert) par un coefficient Epsilon A fonction de la superficie des feuilles (Leaf Area Index, LAI) et un facteur de conversion empirique, Epsilon B. Ce coefficient est également pondéré par un facteur traduisant la satisfaction du besoin en eau (transpiration potentielle/transpiration réelle). SARRA-H soustrait alors à la quantité potentielle d'assimilés créée (en équivalent sucre) une respiration de maintenance dépendant de la température et de la biomasse. Le reste est alors réparti entre les racines, les tiges et les feuilles (règles d'attribution empiriques pendant les phases végétatives et reproductives). Les phases post-floraison sont quant à elles dédiées à la définition du nombre de grains (définition du puits) et à leur remplissage (source). Il n'y a plus de croissance des feuilles ni des racines durant ces phases. La source est représentée par la quantité de sucre produite qui est fonction de l'interception du rayonnement sous contrainte hydrique. Si la demande du puits est supérieure à celle de la source, alors la plante peut puiser dans ses ressources (feuilles et tiges), ce qui produit après la floraison une sénescence des feuilles qui se traduit par une diminution du LAI.

3.4 Variétés utilisées

Nous utilisons dans cette thèse au total trois variétés de mil et trois de sorghos qui ont fait l'objet d'essais en parcelles agronomiques. Les détails sur les variétés ainsi que les essais sont donnés dans le Tableau 5. Les expérimentations ont permis de mesurer, à différents stades du développement des cultures, diverses variables exprimant le développement de la biomasse comme la biomasse aérienne, ou le rendement grain en fonction de pratiques culturales comme la date de semis, la densité de semis, le niveau de fertilisation. Cela a permis par la suite d'optimiser le paramétrage des variétés dans le modèle.

Culture	Variété	Cycle	Photopériodisme	Zone des essais	Année
Mil	Souna III	Court	Faible	Bambey (Sénégal)	2004
	HKP	Court/moyen	Moyen	Niamey (Niger)	2002/2003
	Somno (MTDO)	Long	Fort		
Sorgho	Timari	Moyen/fort	Moyen	3 sites au Mali	2004
	Kénikéba	Long	Fort		
	CSM 63	Court	Faible		

Tableau 5: variétés utilisées avec SARRA-H et endroit de leur calibration

3.5 Date de semis et de re-semis

Si aucune date de semis n'est imposée par l'utilisateur, celle-ci est calculée automatiquement par le modèle de manière à représenter la technique locale de semis des agriculteurs (Marteau *et al.* (2011)) *i.e.* quand une ou plusieurs pluies remplissent les couches supérieures du sol (plus de 10 mm stockée à la fin de la journée, *i.e.* après l'évapotranspiration). Il faut noter que SARRA-H permet de représenter les semis ratés et le re-semis, ce qui est une contrainte importante pour les agriculteurs (Marteau *et al.* (2011)). En pratique, le semis est raté lorsque la croissance de biomasse est négative pendant au moins 11 jours durant les 20 jours suivant le semis. Le modèle va alors chercher à re-semer dès qu'il le peut.

Chapitre 2: Bilan de la littérature sur les changements climatiques passés et futurs en Afrique de l'Ouest et leurs impacts sur les rendements agricoles

Communications relatives à ce chapitre:

- Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P., Berg, A. (2011). The impact of future climate change on West African agriculture : what does the recent literature say ? *Global Environmental Change* 21: 1073-1083
- Roudier, P., Quirion, P. (2009). Bilan des changements climatiques passés et futurs au Mali, rapport pour Action Contre la Faim. 42pp.¹⁶
- Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P., Berg, A. (2011). L'impact du changement climatique futur sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest : bilan des études scientifiques. Grain de Sel (in press)
- Müller, C. (2011). Harvesting from uncertainties. *Nature Climate Change* 1 (5): 253-254

Résumé:

Ce chapitre présente dans un premier temps la zone d'étude d'un point de vue agro-climatique en se focalisant notamment sur l'évolution des variables pluie et température dans le passé, et leurs projections pour le futur. En Afrique de l'Ouest, tous les modèles prévoient notamment un réchauffement futur de +2°C à +6°C en 2100 (tous scénarii confondus) alors que le signe de l'évolution de la pluie future reste incertain. On étudie dans un deuxième temps quels impacts ces changements futurs peuvent avoir sur les rendements agricoles. On réalise pour cela une revue de 16 études scientifiques avec les résultats desquelles on construit une méta base de données d'évolution des rendements futurs. Malgré une grande dispersion dans les changements relatifs de rendement (de -50% à +90%, toutes cultures, horizons temporels, pays confondus), le médiane montre une baisse des rendements de -11%.

Ce signal négatif est suggéré aussi bien par les modèles agronomiques empiriques que mécanistes, alors que l'approche ricardienne donne des résultats très contrastés, même au sein d'une même étude. L'impact prévu est plus important au Nord (-18% pour la médiane des pays soudano-sahéliens) qu'au Sud de la sous-région (pays guinéens, -13%) ce qui est dû à des projections plus sèches et chaudes dans la partie nord de l'Afrique de l'Ouest. De plus, les impacts sur le rendement des cultures sont plus négatifs lorsque le réchauffement s'intensifie, ce qui souligne l'importance de l'atténuation du changement climatique.

La tendance négative des évolutions des rendements futurs vient principalement de l'augmentation de température prévue par les modèles, qui est bien plus importante que les changements de précipitation. Cependant, l'évolution du cumul pluviométrique, suivant qu'il

¹⁶ <http://www.centre-cired.fr/spip.php?article890&lang=en>

est négatif ou pas, peut aggraver ou modérer le signal négatif induit par l'augmentation des températures. Enfin, les résultats soulignent le rôle central de l'effet fertilisant du carbone sur le signe et l'amplitude des évolutions de rendement. Cet effet est particulièrement important pour les scénarii avec de fortes concentrations en carbone et pour les plantes ayant une photosynthèse dite en C3 (e.g. le soja et le manioc). Comme les cultures vivrières sont en Afrique de l'Ouest principalement C4 (mil, maïs, sorgho), cet effet positif est plus limité pour la sous-région.

1. Description de la zone d'étude générale: l'Afrique de l'Ouest

Cette thèse se focalise sur l'Afrique de l'Ouest, pour laquelle nous adoptons une définition large en considérant les pays de la Communauté Economique Des Etats de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO), plus le Cameroun. Cette région connaît une forte hétérogénéité que ce soit au niveau climatique ou de l'occupation du sol. Ainsi, on note un fort gradient nord/sud dans la végétation, dû à la pluviométrie annuelle, plus forte au Sud. On peut de ce fait délimiter de grandes zones agro-climatiques définies notamment par le cumul pluviométrique, la longueur de la saison pluvieuse et la végétation (Figure 8). Ce gradient N/S est le reflet de la migration saisonnière de la Zone de Convergence Inter-Tropicale, qui connaît deux latitudes d'équilibre: la première se situe à 5°N durant le mois de mai et caractérise la première saison des pluies sur la partie guinéenne de la zone (Sud). La seconde est quant à elle à 10°N durant juillet/août et est responsable de la saison pluvieuse plus au Nord en zone soudano-sahélienne et sahélienne (Sultan (2002)). La durée de la saison pluvieuse augmente donc lorsque qu'on progresse vers le Sud: son démarrage est plus précoce (Figure 9) et sa fin plus tardive. En zone soudano-sahélienne la saison pluvieuse s'étend ainsi de juin à milieu octobre et se réduit, plus au Nord, à juillet, août et septembre. Notons que si les cartes de pluviométrie semblent indiquer une relative homogénéité spatiale dans une même zone, des villages voisins peuvent parfois connaître une même année des pluviométries et des dates de démarrage très différents (Balme *et al.* (2005)).

Ces conditions climatiques spatialement contrastées se traduisent comme on l'a vu par différentes formes de végétation mais également de systèmes de cultures. Ainsi, Gafsi *et al.* (2007) en définissent huit différents en Afrique de l'Ouest (Figure 10). Nous nous intéressons particulièrement ici aux systèmes agriculture-élevage en zone sèche et plus marginalement en zone subhumide (Tableau 6). Il est difficile de donner une définition statique des exploitations de ces zones mais elles sont globalement caractérisées par une production de céréales sèches (mil, sorgho, voire maïs), de légumineuses (arachide) et par quelques petits ruminants (ovins et caprins): le lien entre élevage et agriculture s'est à ce propos beaucoup développé récemment (Dugué *et al.* (2004)).

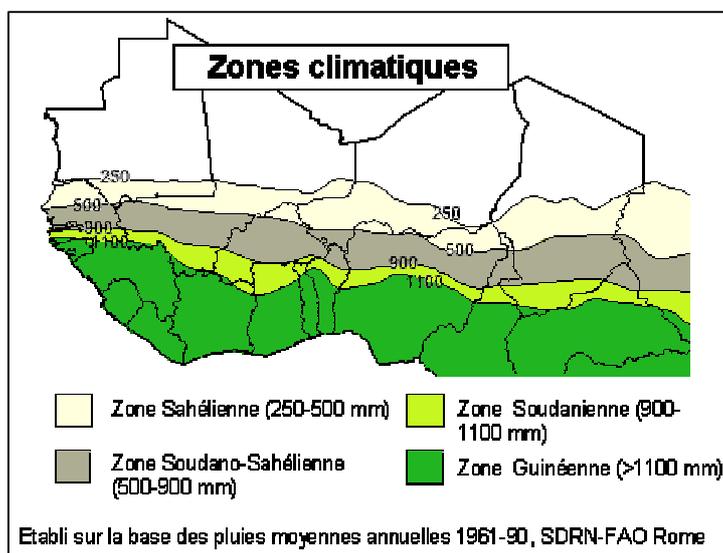


Figure 8: les quatre principales zones agro-climatiques en Afrique de l'Ouest, et leur pluviométrie (source: FAO)

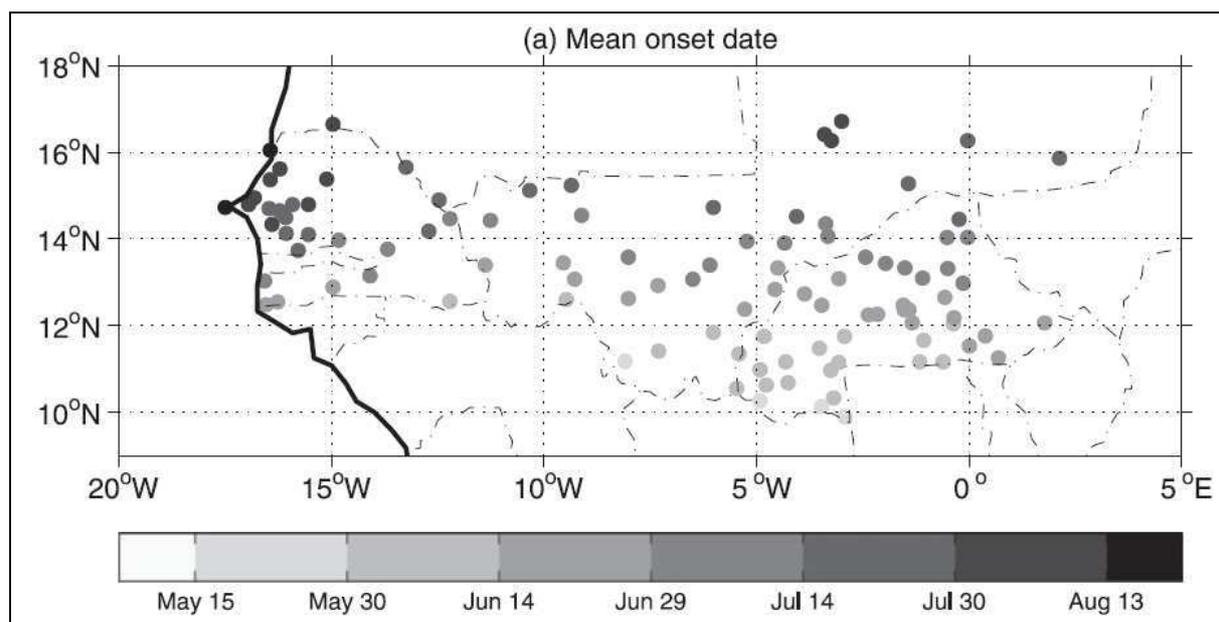


Figure 9: date moyenne (1950/2000) de début de la saison sur une sélection de stations en Afrique de l'Ouest (Marteau *et al.* (2009))

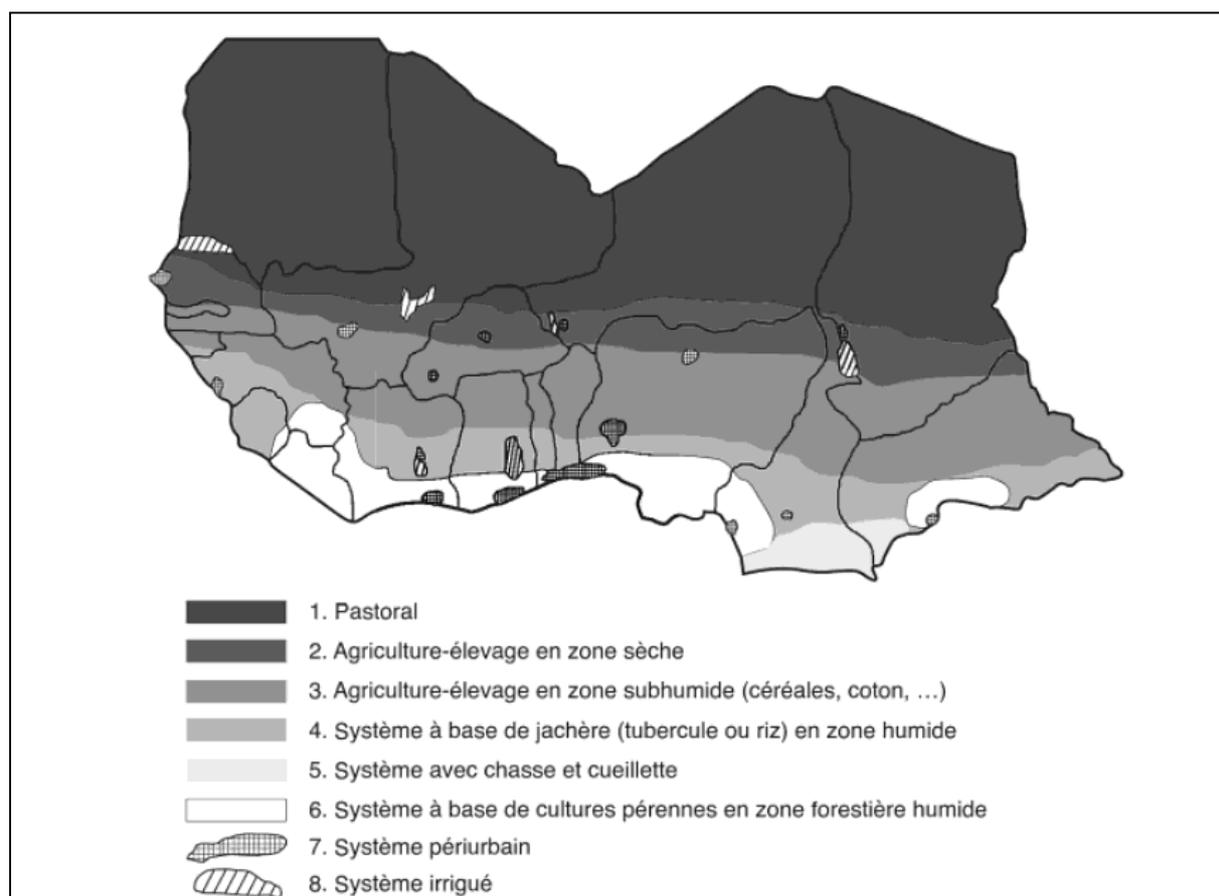


Figure 10: les 8 différents systèmes agricoles en Afrique de l'Ouest (Gafsi *et al.* (2007) p.23))

Système de production	Caractéristiques principales	Pluviométrie (mm/an)	Contraintes principales
Agriculture-élevage en zone sèche	-Céréales (mil, sorgho) dominantes -légumineuses -petits ruminants -Culture manuelle et traction animale	300-700	- aléas pluviométriques - baisse de fertilité du sol -accès limité au foncier du fait de la croissance démographique -accès limité à l'eau d'irrigation pour diversifier et sécuriser la production (maraîchage)
Agriculture-élevage en zone subhumide	-Céréales (maïs, sorgho) -coton -élevage bovin en progression. Système en traction animale dominante.	700-1200	- baisse de fertilité du sol -accès limité au foncier du fait de la croissance démographique -pression parasitaire plus forte pour l'élevage

Tableau 6: caractéristiques des deux principaux systèmes de production étudiés (Gafsi et al, 2007)

Les exploitations auxquelles nous nous intéressons sont de plus généralement faiblement mécanisées et ont peu d'accès aux crédits et aux intrants (*e.g.* Abdoulaye et Sanders (2005)). Les sols sont sableux et ont une faible teneur en phosphore et azote, deux nutriments fondamentaux pour les plantes (Aune et Bationo (2008)). Les intrants chimiques étant rares et la fertilité des sols baissant (*e.g.* Hiernaux *et al.* (2009) dans le Sud du Mali) notamment à cause de l'arrêt des jachères, les agriculteurs sahéliens ont recours fréquemment à la fumure organique pour maintenir des niveaux de rendement acceptables. Si plusieurs types d'exploitations familiales existent (SCSAO (Secrétariat du Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest) (2005)), nous nous intéresserons particulièrement dans cette thèse à la plus courante en Afrique de l'Ouest qui est définie par une production majoritaire de céréales pour l'autoconsommation, des liens limités avec le marché et des contraintes liées à l'accès à l'innovation. Cette définition recoupe celle de Gafsi *et al.* (2007) mais précise les faibles liens avec le marché.

2. Climat passé et agriculture en Afrique de l'Ouest

2.1 Evolutions climatiques passées

Si nous avons précédemment décrit l'Afrique de l'Ouest de façon statique, en employant des moyennes temporelles, on étudie ici les changements connus dans le passé, notamment au niveau de la pluie et des températures. Ce travail est réalisé à l'échelle de la sous-région, en se fondant sur des données observées de pluie et de température mais également, à une échelle plus fine, en se fiant aux témoignages des agriculteurs et éleveurs locaux.

2.1.1 Evaluation à l'aide de données météo

- Pluie:

Le Sahel a connu au début des années 70 un fort déficit pluviométrique (Figure 11) qui a été largement commenté dans la littérature (*e.g.* L'hôte *et al.* (2002); Paturol et Ouedraogo (2003); Roudier et Mahe (2009)) et qui a été notamment marqué par les sécheresses exceptionnelles de 1973/74 1983/84, entraînant des pertes considérables pour les éleveurs et agriculteurs. Si la littérature tout comme les acteurs locaux reconnaissent presque unanimement ces décades sèches (70s, 80s, 90s), la question d'une reprise des pluies au début du XXI^e siècle est en revanche plus discutée (Nicholson (2005)). Lebel et Ali (2009), utilisant une base de données conséquente de pluies journalières sur la sous-région (1950/2007) montrent finalement que la reprise des pluies est plus ou moins marquée sur un gradient ouest/est. En effet, si la reprise se confirme à l'Est de la sous-région avec un retour à une pluviométrie moyenne égale à celle des années 1950-1989, ce n'est pas le cas à l'Ouest où la sécheresse perdure. Ces changements de cumul saisonnier sont la conséquence d'une diminution du nombre d'événements pluvieux et non d'une baisse d'intensité des pluies (Lebel et Ali (2009)). Cela peut de ce fait entraîner des modifications dans les dates de début et de fin de saison, et donc dans la longueur de celle-ci. Ainsi, Frappart *et al.* (2009) parviennent à montrer que la longueur moyenne de la saison des pluies diminue de façon significative sur le mésosite de Gourma au Mali entre 1950 et 2007. Des résultats indiquant globalement un retard significatif dans le début de la saison pluvieuse en Afrique de l'Ouest sont également trouvés par Kniveton *et al.* (2008).

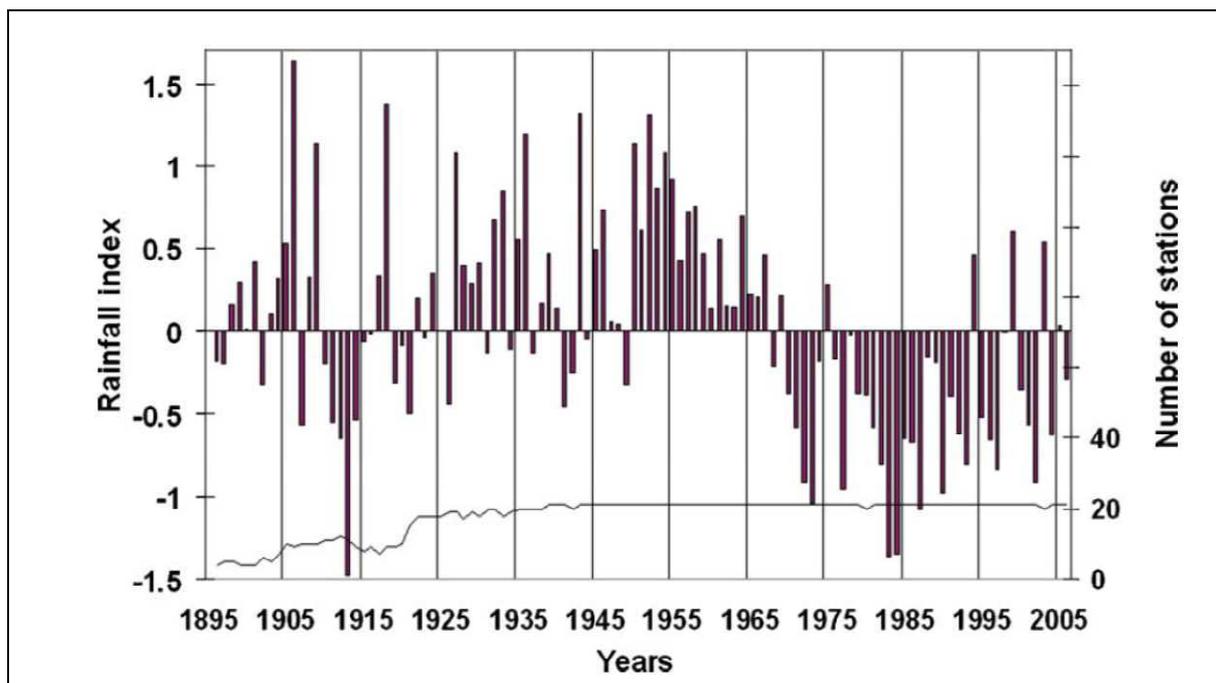


Figure 11: Index de pluies sahéliennes (1896–2006) et nombre de stations (Mahé et Paturol (2009)). Les stations sont réparties dans les zones sahéliennes et soudano-sahéliennes de la sous-région.

- Température

Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (IPCC son acronyme anglais) souligne notamment dans son dernier rapport (IPCC (2007b), chapitre 3) que les températures moyennes ont augmenté en Afrique durant le XX^e siècle. Même si elles augmentent de façon plus modérée que pour certaines régions, notamment le Maghreb et l'Afrique australe (Figure 12), on note tout de même un réchauffement général entre 0.5 et 1°C par siècle, pouvant aller par endroit jusqu'à 1.5°C. Ce réchauffement est confirmé sur une période plus récente (0.15°C/décennie

entre 1979 et 2010 pour l'Afrique tropicale) par Collins (2011) utilisant plusieurs jeu de données. Si on s'intéresse à la répartition de ces températures, cela semble se traduire selon New *et al.* (2006) par une augmentation de la fréquence des vagues de chaleur et par une augmentation du nombre de jours et de nuits extrêmement chauds de en Afrique du Sud et de l'Ouest.

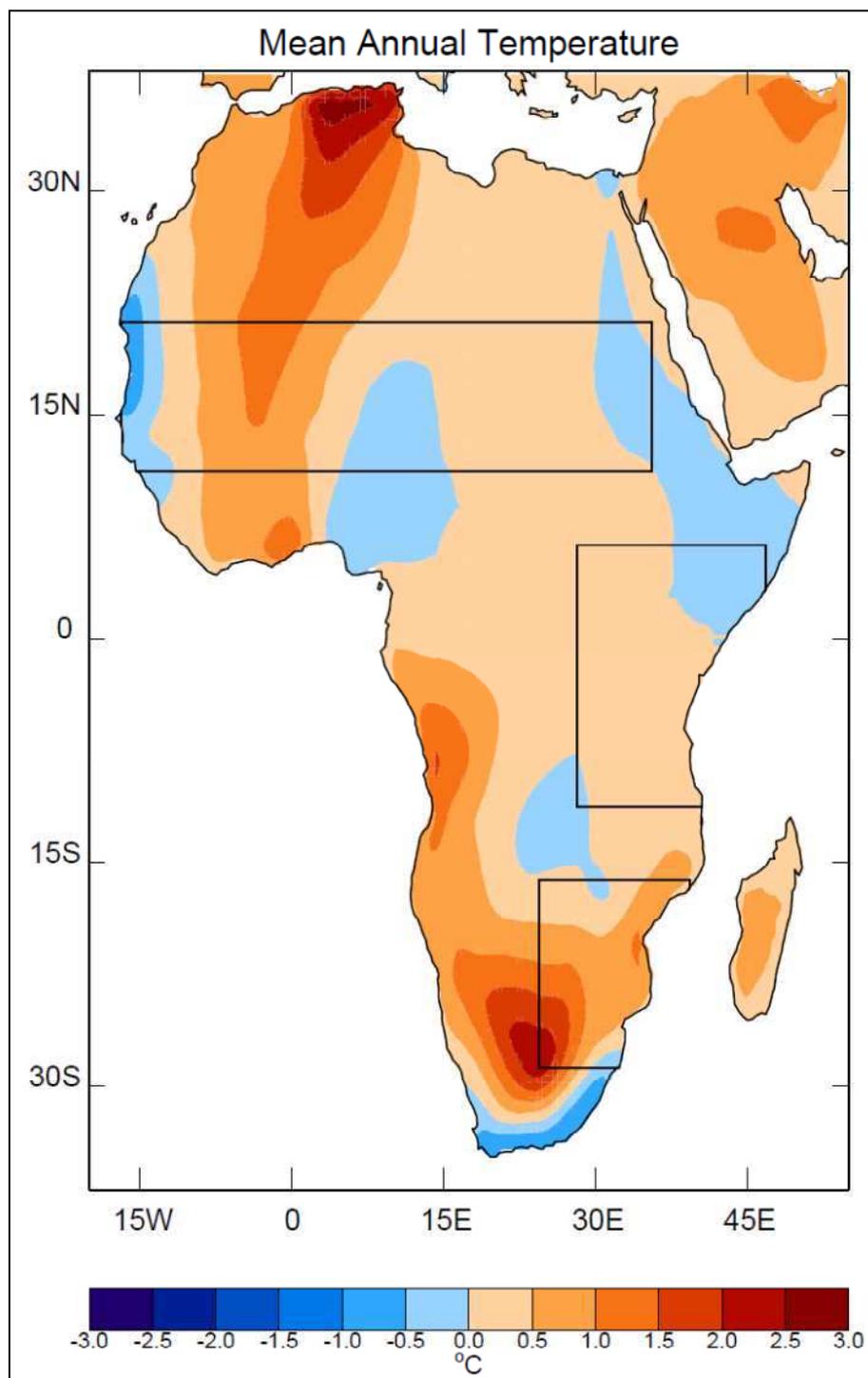


Figure 12: tendance linéaire moyenne de la température annuelle sur la période 1901/1995, en °C/siècle (Hulme *et al.* (2001))

2.1.2 Evaluation du point de vue local

Les données observées de pluie et de températures montrent donc que l'Afrique de l'Ouest a connu dans le passé d'importants changements à l'échelle régionale. On s'intéresse désormais aux perceptions de ces changements à l'échelle locale, afin de voir si elles vont dans le même sens que les constatations faites sur les données observées. Nous avons pour cela effectué une revue de quelques études traitant ce sujet, notamment à l'aide de questionnaires ou d'enquêtes. On en liste les principaux résultats et caractéristiques dans le Tableau 7. Les résultats concernant la pluviométrie sont globalement en accord avec les données observées, puisque toutes les études soulignent une diminution des pluies. Cela s'accompagne fréquemment de changements dans la distribution saisonnière, que ce soit par le nombre de grosses pluies ou simplement la disposition dans la saison. Cependant, notons qu'au Cameroun (Dinar *et al.* (2008)) seulement 25% des personnes interrogées relèvent une baisse des pluies contre 27% qui ne perçoivent aucun changement. L'augmentation de température est quant à elle également quasi-unanime, à part pour le Cameroun. Elle est de plus particulièrement soulignée au Sénégal.

En revanche, la perception des changements dans les vents n'est pas unanime, même au sein d'un même pays. Par exemple, au Burkina Faso, Nielsen et Reenberg (2010) rapportent une augmentation des vents alors que Ouédraogo *et al.* (2010), avec un panel de localités plus vaste, ne soulignent pas de changement (Figure 13). Cependant, Mertz *et al.* (2009) précisent que l'augmentation du vent est le facteur climatique causant le plus d'effet négatif aux cultures et au bétail au Sénégal.

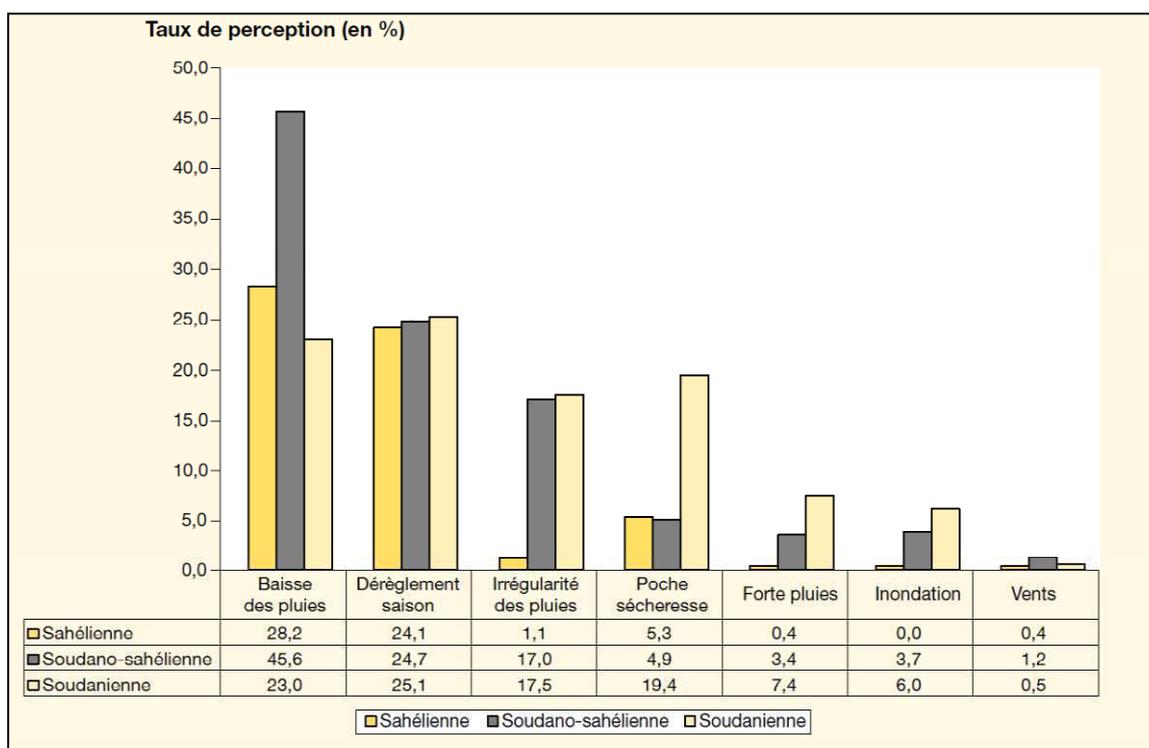


Figure 13: Les perceptions du changement climatique dans trois zones agro-climatiques du Burkina Faso, selon Ouédraogo *et al.* (2010)

Etude	Zone	Pluie	Température	Vent	Autres/commentaires
Mertz <i>et al.</i> (2009)	Sénégal	-Moins de pluie -Moins intenses	-Augmente (toute période) -Périodes de fortes chaleurs plus longues	-Vent plus fort surtout en saison sèche	Le vent est le facteur ayant le plus d'effets négatifs sur les cultures et le bétail, puis ce sont les fortes pluies
Nielsen et Reenberg (2010)	Burkina Faso	-Moins de pluie -saison moins longue -plus d'écart entre les pluies -pluies extrêmes	-plus chaud surtout pendant saison sèche	-Vent plus fort -Porte plus de sable	
West <i>et al.</i> (2008)	Burkina Faso	-Déclin sur le long terme -pas de reprise -années sèches plus communes -baisse est due à une diminution des grosses pluies en juillet/août			
Ouédraogo <i>et al.</i> (2010)	Burkina Faso	- ~25% : dérèglement de la saison -76% : les pluies ont changé -pas de perception du retour des pluies		- peu nombreux à noter un changement	Voir Figure 13 pour la répartition par zones agro-climatiques
Apata <i>et al.</i> (2009)	Niger	-Baisse des pluies -changement dans le timing	Pas de changement		
Dinar <i>et al.</i> (2008)	Burkina Faso	-Baisse: 42% -Hausse: 5% -Rien: 19% -changement du timing des pluies: 30%	-baisse: 1% -hausse: 25% -Rien: 0%		
	Cameroun	-Baisse: 25% -Hausse: 11% -Rien: 27% -changement du timing des pluies:18%	-baisse: 4% -hausse: 22% -Rien: 29%		
	Ghana	-Baisse: 57% -Hausse: 3% -Rien: 4% -changement du timing des pluies: 38%	-baisse: 1% -hausse: 62% -Rien: 14%		
	Niger	-Baisse: 60% -Hausse: 13% -Rien: 5% -changement du timing des pluies: 2%	-baisse: 10% -hausse: 50% -Rien: 13%		
	Sénégal	-Baisse: 84% -Hausse: 1% -Rien: 0% -changement du timing des pluies: 85%	-baisse: 2% -hausse: 69% -Rien: 0%		

Tableau 7: revue des perceptions du changement climatique par les locaux en Afrique de l'Ouest

Mertz *et al.* (2010) s'intéressent de plus, et en utilisant un jeu de questionnaires réalisé dans cinq pays (Sénégal, Mali, Burkina Faso, Niger et Nigeria), à l'importance de ces variables climatiques pour les agriculteurs et les éleveurs. Ils montrent ainsi que le poids des facteurs climatiques pèse entre 30 et 50% (selon les cultures et les zones) dans le déclin perçu par les exploitants de la production agricole pluviale. Par exemple, en moyenne 40 % des agriculteurs interrogés (30% dans la zone 700-900mm et 50% dans la zone 500-700 mm) imputent majoritairement la baisse de la production de mil au climat en général (pluie, vent, température, sécheresses, inondations) et fréquemment aux pluies insuffisantes. En revanche, le poids des facteurs climatiques sur le bétail (surface de pâturage...) est beaucoup plus limité.

2.2 Evolution de la production agricole passée au regard des changements climatiques

2.2.1 Lien entre climat et rendement

On voit donc que, pour les agriculteurs, le climat et l'évolution de la production sont intimement liés. Grâce à une étude statistique sur l'Afrique sub-saharienne (ASS), Barrios *et al.* (2008) aboutissent à des conclusions similaires. Ils montrent en effet que si le climat de la région (pluie et température) était resté le même que dans les années 60 (*i.e.* avec des conditions plus favorables), l'écart entre les pays d'ASS et les autres pays africains serait à l'heure actuelle seulement 32% de l'écart existant. On peut cependant se demander si ce sont les changements de température ou de pluie qui sont responsables de cette relation.

Si on raisonne sur la variabilité interannuelle (*i.e.* si on regarde les années une par une), les précipitations semblent avoir un rôle majeur. Cela est notamment illustré par les sécheresses qui ont eu lieu durant les années 70s et 80s dans la sous-région et qui ont entraîné une baisse considérable de la production agricole. Par exemple, les PIB du Mali et du Niger ont chuté respectivement de 9% et 18% à la suite de la sécheresse de 1984 (Kandji *et al.* (2006)). Ce lien est également mis en lumière à une autre échelle par Berg (2011) qui étudie la corrélation entre les rendements FAO du mil et le cumul pluviométrique annuel. Il trouve ainsi pour le mil en Afrique de l'Ouest un coefficient de corrélation R de 0.63 qui confirme le lien entre un indicateur climatique simple et les rendements d'une céréale pluviale, le mil. En employant de plus nombreux indicateurs de pluie conjointement, Adejuwon (2006a) trouvent même sur le Nigéria des corrélations plus élevées, avec un coefficient de corrélation R de 0.74 pour le mil.

Cependant, lorsqu'on raisonne en moyenne sur une longue période de temps, l'effet passé des changements de température semble avoir en Afrique un impact supérieur à celui de la pluie. Schlenker et Lobell (2010) montrent ainsi sur la période 1961/2002 que l'effet marginal sur la production agricole d'un écart-type de température est supérieur à celui d'un écart-type de précipitation (l'écart-type étant calculé sur les données 1961/2002). Kurukulasuriya et Mendelsohn (2007) trouvent également un effet marginal de la température sur le revenu agricole supérieur à celui de la pluie (pour l'Afrique dans sa globalité).

Finalement, la pluie apparaît comme un des facteurs déterminant de la variabilité interannuelle des rendements. Cela est surtout vrai lors d'années peu pluvieuses: en effet, si une année avec un fort cumul n'est pas nécessairement une bonne année, une année où il n'y a vraiment pas d'eau (année 1984 sur la Figure 14) ne peut pas être une bonne année. La température joue quant à elle plus sur les tendances moyennes et intervient moins dans la variabilité interannuelle. Ainsi, nous trouvons une corrélation très faible ($R=-0.035$) entre le rendement du mil (moyenne sur 9 pays d'Afrique de l'Ouest) et la température moyenne calculée sur Mai, Juin, Juillet, Août, Septembre, alors que la corrélation avec le cumul pluviométrique est de 0.37 et peut aller jusqu'à 0.43 selon la période utilisée pour la corrélation. Notons que la valeur trouvée ici est différente de celle de Berg (2011) car la zone considérée n'est pas exactement la même.

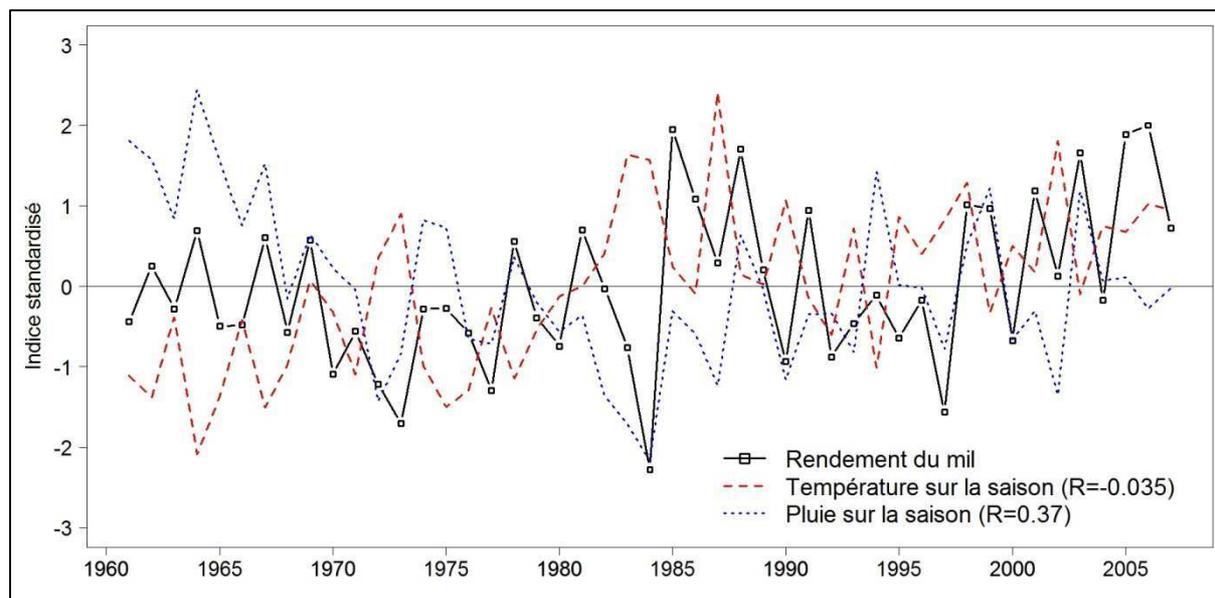


Figure 14: évolution moyenne sur 9 pays d'Afrique de l'Ouest et sur la période 1961/2007 du rendement du mil (données FAO, moyenne sur les 9 pays en pondérant par la surface cultivée), de la température moyenne de la saison pluvieuse (données du CRU TS 3.1, moyenne pondérée par la superficie cultivée de mil (Monfreda *et al.* (2008)) sur les 9 pays concernés) et du cumul pluviométrique (données du CRU TS 3.1, pondérées par la superficie cultivée de mil sur les 9 pays concernés). R est le coefficient de corrélation de Pearson entre les rendements et l'une ou l'autre des variables climatiques.

2.2.2 Evolution passée

On a vu dans les sections précédentes (i) que la sous-région a connu un déficit pluviométrique important ainsi qu'un réchauffement et que (ii) il existe un lien entre climat et rendement. Malgré cela, sur la sous-région dans sa globalité, les rendements moyens des principales céréales ont tendance à augmenter sur la période 1961/2009 (Figure 15). Cela est dû notamment à l'effet des améliorations techniques (*e.g* nouvelles variétés, engrais) et à l'impact plus modéré des sécheresses dans les pays de la zone guinéenne. Cette tendance régionale ne reflète cependant pas la situation de tous les pays: en effet, si on considère un groupe de pays plus réduit¹⁷ (Figure 14, pour le mil), il est notable que les rendements augmentent de façon moins franche, voire stagnent ou diminuent pour certains pays: au Niger par exemple (Figure 16), les rendements ont diminué par rapport aux années 60. Cependant, la production agricole reste en augmentation même dans ces pays grâce à une progression des surfaces cultivées réalisée par arrêt des jachères et augmentation de la déforestation. Notons que l'arrêt des jachères est un des facteurs entraînant une baisse de fertilité des sols (*e.g* Hiernaux *et al.* (2009) dans le Sud du Mali).

¹⁷ Sénégal, Gambie, Guinée, Guinée Bissau, Mali, Niger, Burkina Faso, Togo, Bénin

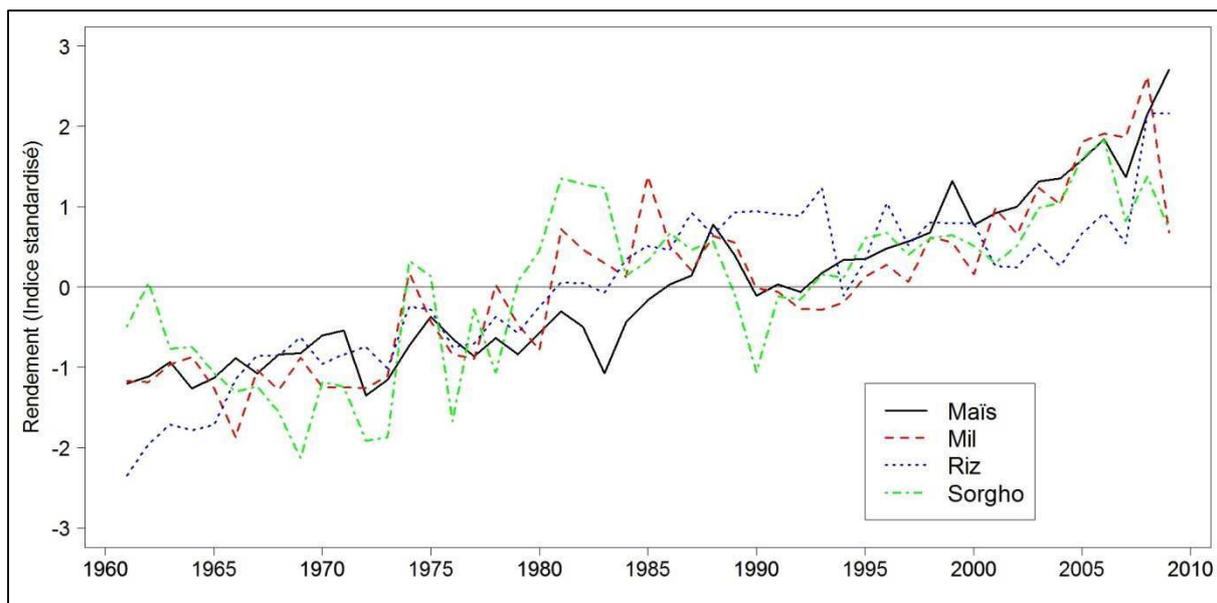


Figure 15: évolution du rendement des principales céréales sur la période 1961/2009 (données FAO). Il s'agit d'une moyenne sur tous les pays d'Afrique de l'Ouest (pondérée par la surface).

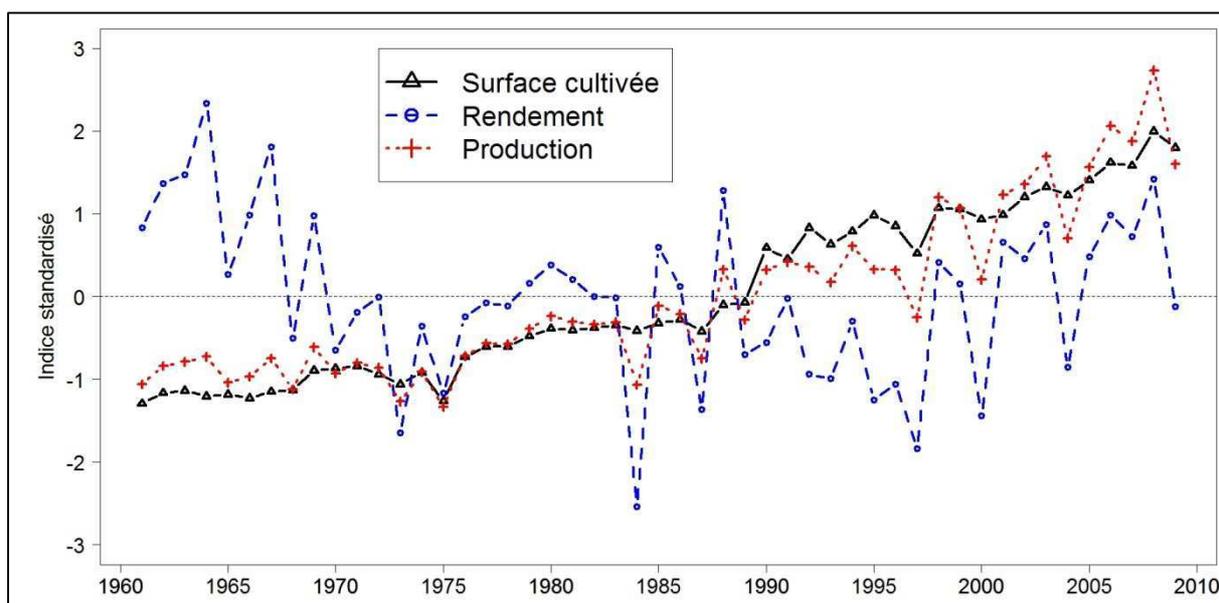


Figure 16: évolution de la surface cultivée, du rendement et de la production du mil au Niger, pour les années 1961/2009. Les données sont présentées en indice standardisé. Données FAOSTAT.

En conclusion, on a vu à travers les perceptions des acteurs locaux et à travers des études scientifiques que le climat ouest-africain avait beaucoup changé durant le siècle dernier, notamment au niveau de la pluviométrie, et que ces aléas jouaient un rôle important sur les rendements agricoles. Si la production agricole a pu augmenter et ainsi suivre la demande accrue par la croissance démographique grâce à l'augmentation des surfaces cultivées, ce mécanisme sera de plus en plus difficile dans le futur (Breisinger *et al.* (2011)). Le climat va ainsi prendre un rôle encore plus important dans la production agricole. Il paraît donc désormais fondamental de s'intéresser aux possibles climats futurs de la sous région et, *in fine*, à l'évolution potentielle des rendements agricoles.

3. Climat futur en Afrique de l'Ouest

Les dernières décennies ont vu l'avènement des modèles climatiques de circulation générale (GCMs) qui ont permis, en représentant les relations atmosphère/océan/végétation avec toujours plus de précision, de pouvoir calculer les variables climatiques futures à divers horizons temporels. Pour cela, il est nécessaire d'émettre des hypothèses sur les différents scénarii d'émission possibles. Ainsi, le dernier rapport de l'IPCC (IPCC (2007a)) utilise des scénarii standardisés, dits SRES (Special Report on Emission Scenarios) afin de pouvoir donner les évolutions climatiques futures calculées par 21 GCMs différents. Nous rappelons ci-dessous les principaux résultats concernant la sous-région pour la pluie et les températures.

3.1 Température

Comme pour le reste du monde, on prévoit pour l'Afrique de l'Ouest un réchauffement, allant en moyenne de +2°C à +6°C en 2100 (Figure 17), selon les scénarii d'émissions et les GCMs. La Figure 17 montre également (enveloppe rose) la dispersion entre les différents modèles climatiques pour un même scénario d'émission. On voit donc que, même si tous les modèles présentent un signal de réchauffement, celui-ci varie pour un même scénario (A1B) de +1.8°C à +4.7°C sur la période 2080/2099. Selon Battisti et Naylor (2009), cette augmentation de température engendrerait à l'horizon 2090 en Afrique de l'Ouest une probabilité d'au moins 90% d'avoir une moyenne des températures sur juin/juillet/août supérieure à la plus forte canicule de la période 1900/2006. De plus, ce réchauffement moyen n'est pas uniforme sur toute la région (Figure 18): les côtes du Golfe de Guinée semblent par exemple sujettes au réchauffement dans une moindre mesure.

Notons que les sorties des modèles climatiques du prochain rapport de l'IPCC (AR5) sont désormais en partie disponibles, ce qui permet d'effectuer une première comparaison entre les simulations utilisées pour l'AR4 pour l'AR5. Nous avons ainsi comparé sur l'Afrique de l'Ouest (19°O et 17°E en longitude et 2.5°N à 25°N en latitude) les anomalies de température moyenne sur la saison pluvieuse (mai à septembre) pour les scénarii SRES A1B, A2 et B1 (GCMs de l'AR4) et les nouveaux scénarii RCP 6.0, 8.5 et 4.5 qui sont des scénarii proches des trois précédents (GCMs de l'AR5). Nous avons comparé l'ensemble des anomalies prévues par les GCMs pour deux horizons de temps (2031/2050 et 2071/2090). Pour ces deux horizons, l'anomalie de température moyenne prévue par les GCMs de l'AR4 (avec les trois scénarii ensemble) n'est pas statistiquement significative différente de celle prévue par les modèles de l'AR5. On rappelle cependant que ceci n'est qu'un premier résultat illustratif avec seulement une partie des nouvelles simulations.

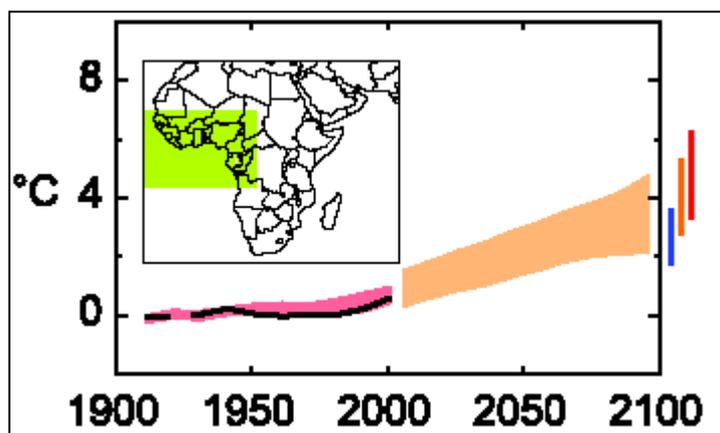


Figure 17 : anomalies de température par rapport à la période 1901/1950 pour l'Afrique de l'Ouest. La ligne noire représente les valeurs observées, l'enveloppe rose les projections pour 2001 à 2100 selon le scénario A1B avec tous les GCMs. Les lignes à droite représentent la gamme des changements projetés pour 2091 à 2100 selon 3 scénarii : A1B (orange), B1 (bleu) et A2 (rouge). Source : IPCC (2007b), chapitre 11, p. 868.

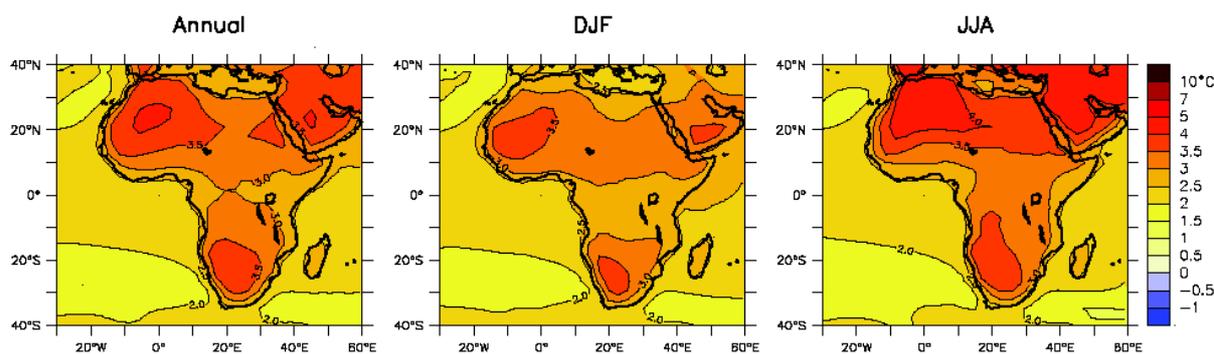


Figure 18 : évolution de la température moyenne entre 1980/1999 et 2080/2099 sur toute l'année (annual), Décembre, Janvier, Février (DJF) et Juin, Juillet, Août (JJA). Résultats issus de 21 modèles de l'IPCC pour le scénario A1B, source : IPCC (2007b), chapitre 11, p. 869.

3.2 Pluie

Contrairement à d'autres régions comme l'Afrique de l'Est, les GCMs sont globalement en désaccord sur la tendance concernant la pluviométrie (Figure 19) en Afrique de l'Ouest. Durant la saison pluvieuse par exemple, et en moyenne sur la région, à peu près autant de modèles climatiques prévoient une augmentation qu'une diminution de la pluie. Si ce résultat concernant le cumul saisonnier (ou annuel) est également confirmé par Vigaud *et al.* (2009), Biasutti et Sobel (2009) montrent que les GCMs indiquent cependant une tendance commune lorsqu'on s'intéresse aux anomalies mensuelles (Figure 20). Ainsi le Sahel pourrait connaître au XXI^e siècle des anomalies de pluies négatives plutôt en début de saison (mai et juin) et positives à la fin (septembre et octobre). Des résultats similaires, indiquant un glissement potentiel de la saison des pluies, sont trouvés par Patricola et Cook (2009).

Comme dans la section précédente, on peut désormais analyser succinctement les premiers résultats des modèles de l'AR5. Si les anomalies moyenne de température ne sont pas statistiquement différentes, ce n'est pas le cas pour les précipitations: les nouvelles simulations prévoient légèrement plus de pluie que celles de l'AR4 (significatif à 5%) et les anomalies sont significativement supérieures à zéro. Ces résultats ne sont cependant que temporaires.

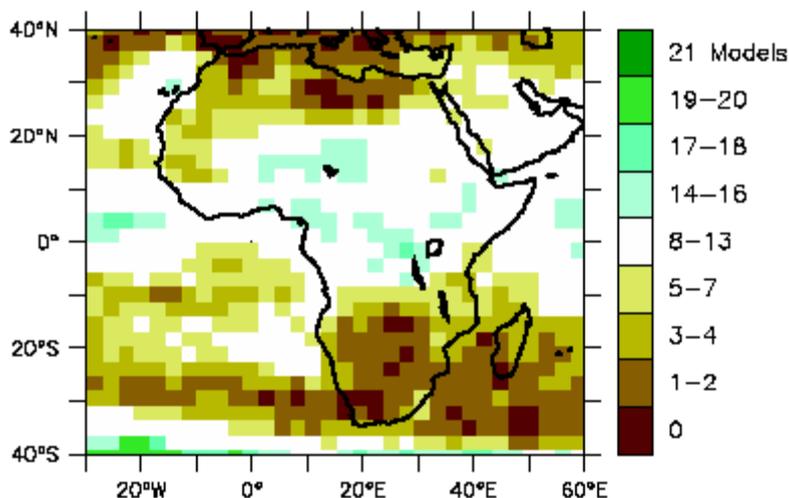


Figure 19 : nombre de modèles (sur 21 de l'IPCC) prévoyant une augmentation des précipitations entre 1980/1999 et 2080/2099, pour Juin, Juillet et Août, selon le scénario A1B. Source: IPCC (2007b), chapitre 11, p. 869.

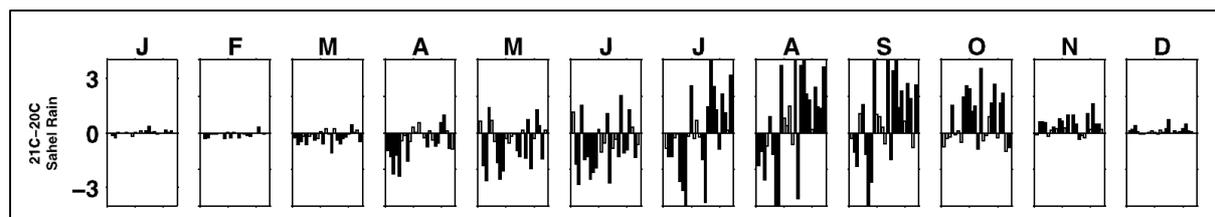


Figure 20: anomalies mensuelles de la pluviométrie future du Sahel (2075/2099 vs 1975-1999, ordonnées en % du cumul mensuel de la période 1975-1999): chaque barre représente un des modèles CMIP3. Les barres remplies sont significatives à 95%. Figure issue de Biasutti et Sobel (2009)

Finalement, on a vu que les modèles climatiques prévoient des changements importants pour le climat futur de l'Afrique de l'Ouest, via notamment un réchauffement prononcé et des modifications de la pluviométrie qui pourraient engendrer un décalage temporel de la saison pluvieuse. Ces modifications sont ainsi susceptibles d'avoir un impact non négligeable sur les rendements des cultures de la sous-région. Si on a vu auparavant que les aléas pluviométriques pouvaient donner lieu à des variations de rendement importantes et que le réchauffement avait également un effet moyen négatif, il n'existe pas d'exemple dans le passé de réchauffement aussi prononcé que celui prévu pour le XXI^e siècle. Pour ces raisons, il paraît donc fondamental d'étudier par la suite la question de l'impact du climat futur sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest.

4. Evolution potentielle des rendements futurs: une revue (issu de

Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P., Berg, A. (2011). The impact of future climate change on West African agriculture : what does the recent literature say ? *Global Environmental Change* 21: 1073-1083)

La quantification de l'impact du climat sur les rendements agricoles représente actuellement un réel défi, notamment à cause de nombreuses incertitudes sur certains paramètres. On peut citer entre autres la réponse des cultures aux changements environnementaux (pluie, température, concentration en CO₂), le couplage entre modèles climatiques et fonctions de production agricoles et l'adaptation des systèmes de cultures aux changements climatiques progressifs (Challinor *et al.* (2007)). Ces incertitudes peuvent donc produire des projections de rendements différentes selon les méthodes utilisées. Il paraît donc nécessaire d'effectuer une revue de la littérature scientifique pour pouvoir prendre en compte tous les résultats, issus de différentes méthodes. Si Müller *et al.* (2011) ont effectué en parallèle le même genre de travail, leur étude est consacrée à l'Afrique subsaharienne et non à l'Afrique de l'Ouest.

Ainsi, nous avons construit une méta-base de données constituée de seize études récemment publiées. Cette base nous permet de ce fait de quantifier la gamme des impacts prévus sur la production agricole mais également d'analyser les sources d'incertitude de ces projections. Notons qu'étant donné le nombre important de régions, cultures et méthodes traitées dans ces seize papiers, une telle méta-analyse est forcément imparfaite. Nous ne disposons pas en effet d'assez d'études pour avoir suffisamment de valeurs pour chaque cas de figure (*e.g.* le mil, au Sénégal, en 2050). Une analyse de ce type reste cependant une première étape nécessaire pour identifier les principales causes d'incertitude dans ce genre de travail, et un pré-requis fondamental pour produire des résultats fiables (Challinor *et al.* (2009)).

4.1 Matériel et méthodes

4.1.1 Méthodologie générale de travail

La littérature concernant les impacts du changement climatique sur l'agriculture en Afrique, et ailleurs dans le monde, montre une méthodologie caractéristique décrite Figure 21. Ainsi, quantifier les variations de rendements des cultures dues aux changements climatiques requière les principales étapes suivantes.

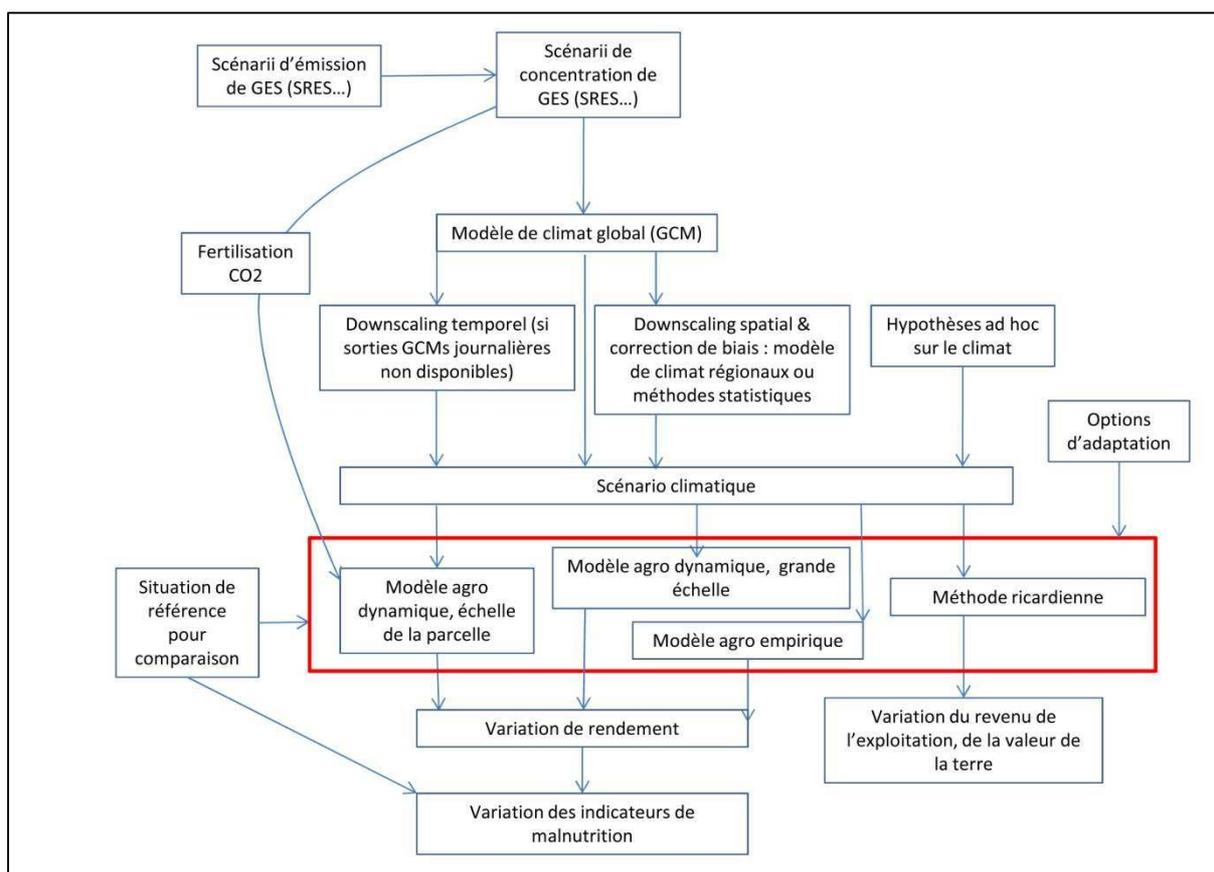


Figure 21: résumé de la méthode de travail des études d'impacts du changement climatique sur les rendements

- Générer le climat futur

Afin de pouvoir quantifier l'impact du changement climatique sur une variable donnée, il est tout d'abord nécessaire de définir des scénarii décrivant l'évolution future des variables météorologiques. La manière la plus simple est de créer un scénario uniforme (*e.g.* +10% de pluie, +2°C pour les températures) et d'appliquer ce changement à des données climatiques observées représentant la période de référence. Au sein des seize études sélectionnées ici, certaines observent cette approche: Ben Mohamed *et al.* (2002), Salack (2006) et Vanduivenbooden *et al.* (2002). Cependant, il est clair que cette méthode, bien que permettant de faire des analyses de sensibilité intéressantes, repose sur des hypothèses fortes sur le climat futur et ne conserve pas forcément la cohérence entre les variables climatiques. Une approche aux fondements scientifiques plus solides existe, via l'utilisation de GCMs. Comme on l'a vu dans la section 3 de ce chapitre, les GCMs donnent une grande variété de réponses pour une même variable: cela est dû aux nombreux scénarii d'émissions et à la différence de conception des modèles. Ainsi, pour échantillonner une partie de l'incertitude dans les projections climatiques, la majorité des études publiées utilise plusieurs GCMs et/ou plusieurs scénarii (*e.g.* Schlenker et Lobell (2010))

- Modéliser les cultures

Afin de traduire les scénarii climatiques en production agricole potentielle, deux approches distinctes sont généralement employées: la première se fonde sur des modèles agronomiques statistiques et la seconde sur des modèles mécanistes, les deux cherchant à estimer la productivité agricole en réponse au climat. Les modèles agricoles empiriques sont fondés sur une relation statistique dérivée de données observées et lient les rendements agricoles, à un endroit donné, à des variables climatiques. Bien qu'une telle relation soit relativement facile à établir, calibrer et valider un modèle statistique robuste demande de longues séries de données (climat et rendements). Cette relation revêt cependant un avantage notoire puisqu'elle peut être établie directement à grande échelle (*e.g.* nationale) en utilisant des données climatiques agrégées spatialement, afin de prédire les rendements sur de vastes régions. Dans cette revue, Lobell *et al.* (2008) et Schlenker et Lobell (2010) suivent entre autres cette approche. Ils considèrent que cela permet une évaluation simple des futurs impacts climatiques à une échelle pertinente pour informer les décideurs.

L'autre approche est la modélisation "mécaniste" ou "dynamique", fondée sur des équations représentant les processus physiologiques de la croissance des cultures (assimilation du carbone et des nutriments, transpiration...) et de leur développement en réponse au climat (*e.g.* apparition des organes successifs, phase végétative et reproductive). Etant donné que cette approche permet en théorie de saisir les effets intra-saisonniers et non linéaires du climat sur les cultures, la plupart des études d'impact en agriculture utilise un modèle mécaniste (Tableau 8). Cependant, tous les modèles de ce type n'ont pas la même approche physiologique et n'atteignent pas le même niveau de détail. En particulier, l'effet positif sur la photosynthèse d'une concentration atmosphérique élevée en CO₂ (Tubiello *et al.* (2007a)) n'est pas prise en compte dans tous les modèles mécanistes (*e.g.* Salack (2006)). De plus, ces modèles nécessitent de nombreux paramètres et sont de ce fait utilisés à l'échelle de la parcelle où ces données sont disponibles et peuvent être considérées comme homogènes: ils ne fournissent pas directement d'information sur les impacts climatiques à plus large échelle.

Il faut noter qu'une troisième approche, l'analyse ricardienne (Mendelsohn *et al.* (1994)) est également utilisée pour estimer l'impact du changement climatique sur l'agriculture en Afrique de l'Ouest (*e.g.* Kurukulasuriya et Mendelsohn (2007); Molua (2009)). Cette approche se concentre sur le revenu net des exploitations agricoles au lieu des rendements agricoles et, à la différence de la plupart des études d'impact, prend en compte les stratégies d'adaptation. L'approche ricardienne procède globalement en plusieurs grandes étapes: (i) la collecte d'informations socio-économiques concernant les exploitations agricoles, (ii) le calcul du revenu net de l'exploitation grâce à ces informations, (iii) la mise en place d'une régression entre le revenu net calculé et différentes variables comme le climat, le sol et un ensemble de variables économiques et (iv) l'utilisation du lien établi entre revenu et climat pour projeter l'impact du climat futur. Notons qu'à la différence des approches empiriques, les régressions effectuées ici ne sont que pour une année: il s'agit donc d'une étude de la variabilité spatiale.

- Relier les GCMs et les modèles de culture

La combinaison d'un GCM avec un modèle agronomique soulève plusieurs problèmes. Premièrement, les GCMs présentent le plus souvent des biais significatifs dans leurs simulations du climat, notamment pour les cumuls et distributions régionaux de précipitation: la part des petites pluies (<10mm/jour) dans le cumul total et leur fréquence sont surestimées alors que c'est l'inverse (sous-estimation) pour les grosses pluies (>20 mm/jour) (Randall *et al.* (2007); Dai (2006)). Ainsi, certaines études d'impact qui donnent des résultats localisés requièrent normalement un certain niveau de correction de biais. La méthode de correction la plus simple est la méthode des anomalies. Pour un GCM donné, une anomalie moyenne annuelle calculée entre le futur et le climat actuel simulé est ajoutée à un jeu de données actuelles observées. Dans cette revue, Müller *et al.* (2010) adoptent par exemple cette approche. Deuxièmement, la combinaison d'un GCM et d'un modèle

déterministe est plus complexe qu'un couplage simple de deux modèles à cause de la différence entre leurs échelles respectives. En effet, les GCMs produisent typiquement des projections climatiques à une échelle de 2° et, alors que les modèles statistiques peuvent être directement calibrés pour utiliser en entrée des informations agrégées de ce type, les modèles mécanistes requièrent des données à une échelle plus fine. Il faut donc généralement effectuer une étape de descente d'échelle (*downscaling* en anglais), de l'échelle globale du GCM à l'échelle locale du modèle agronomique. La descente d'échelle temporelle peut également être de rigueur quand les sorties du GCM sont disponibles uniquement à l'échelle mensuelle: par exemple, pour certaines simulations du CMIP3 archivées par le PCMDI (voir http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/data_status_tables.htm). On définit en général deux types de descente d'échelle (qui peuvent parfois être combinés):

- La descente d'échelle statistique, dans laquelle des relations empiriques entre la circulation atmosphérique de méso-échelle et le climat local sont utilisées pour créer des séries temporelles réalistes de variables climatiques locales. Cette méthode inclut les générateurs de temps stochastiques, les régressions (linéaires ou non), la méthode des types de temps. Zorita et Von Storch (1999) et Müller *et al.* (2010), par exemple, utilisent un générateur de temps stochastique pour passer de variables climatiques mensuelles à un pas de temps horaire.

- La descente d'échelle dynamique, qui utilise des modèles de climat régionaux, à une résolution fine (environ 10-50 km), imbriqués dans le GCM (Paeth *et al.* (2011)). Il faut noter cependant que dans les études d'impact de cette revue, le type de méthode de descente d'échelle (si il y en a) n'est pas systématiquement rapporté ni détaillé.

Récemment, le besoin de modélisation agronomique pour des études sur le changement climatique a mené au développement de modèles mécanistes à une échelle globale. Ces modèles sont créés et calibrés pour fonctionner directement à une échelle compatible avec les sorties des GCMs, ce qui permet d'éviter l'étape de descente d'échelle. Certains modèles sont développés pour être indépendants des modèles d'impact alors que d'autres le sont comme partie de modèles de végétation globaux, où ils servent pour les terres cultivées (de Noblet-Ducoudré *et al.* (2004); Bondeau *et al.* (2007); Berg (2011)). Ils peuvent ainsi au besoin être utilisés pour des études d'impact du climat. Dans cette revue, Müller *et al.* (2010), utilisent un tel modèle, LPJ-ml (Bondeau *et al.* (2007)).

- Adaptation au changement climatique

Lorsqu'on étudie l'impact du changement climatique sur les rendements, il est nécessaire de savoir si les études prennent l'adaptation au changement climatique en compte. Selon Chuku et Okoye (2009), les options d'adaptation disponibles en agriculture pour faire face au changement climatique peuvent être classées en quatre grandes catégories: (i) la gestion des revenus/actifs, (ii) les assurances et programmes gouvernementaux, (iii) les pratiques de production des exploitations et (iv) le développement technologique. Cette même étude souligne également que ces catégories sont caractérisées par l'échelle (locale, nationale) et le type d'agents impliqués. De nombreuses options d'adaptation sont déjà utilisées à l'échelle locale par les agriculteurs sahéliens. Ce sont généralement des pratiques de production (*e.g.* gestion de l'eau, sélection de certaines variétés, fertilisation) mais aussi des techniques de gestion des revenus (*e.g.* diversification des revenus, migrations). On voit ainsi qu'il peut être nécessaire de considérer l'adaptation dans ce type d'études si on veut éviter une surestimation de l'impact du changement climatique sur les rendements agricoles.

Cependant, dans la plupart des articles sélectionnés, l'adaptation n'est pas explicitement prise en compte. Dans certaines études (*e.g.* Müller *et al.* (2010)), la date de semis change chaque année mais reste fondée globalement sur la même technique de semis: cette attitude est donc plus une adaptation à la variabilité interannuelle du climat qu'au changement climatique. Tingem et Rivington (2009) simulent quant à eux le rendement de certaines cultures avec et sans adaptation. Ils considèrent de nouvelles dates de semis et d'hypothétiques variétés améliorées. Les pertes de rendements futures sont ainsi clairement limitées. Dans le même ordre d'idée, Butt *et al.* (2005)

présentent leurs résultats conjointement sans adaptation et avec un ensemble d'options d'adaptation théorique: options économiques, mélange de cultures et variétés résistantes à la chaleur. Là aussi, ces options augmentent clairement les rendements futurs. Soulignons que pour ces deux études, nous incluons uniquement dans notre base de données les valeurs sans adaptation car certaines des ces possibilités d'adaptation sont hypothétiques. Enfin, les études ricardiennes considèrent une adaptation totale. Cependant, il n'est pas possible de détailler dans les résultats quelles options sont utilisées et l'impact des changements climatiques sans adaptation. De plus, cette méthode ne prend pas en compte les coûts de transition et surestime donc les bénéfices de l'adaptation.

Globalement, les études sélectionnées s'intéressent plus particulièrement à l'impact brut du changement climatique sur les rendements sans prendre en compte des stratégies d'adaptation particulières.

4.1.2 La méta-base de données

Notre recherche dans la littérature couvre les publications principales au sujet de l'impact du changement climatique sur les rendements des cultures en Afrique de l'Ouest. Seules sont incluses les études où l'évolution relative du rendement entre la période actuelle et le futur est indiquée numériquement, par une échelle de couleur sur une carte ou grâce à une communication personnelle avec les auteurs. Les études ricardiennes n'ont pas été incluses puisqu'elle s'intéresse à la valeur nette du revenu et non aux rendements. Cependant, les résultats concernant les analyses ricardiennes sont présentés séparément en section 4.2.7.

Au total, nous avons utilisé seize études pour construire la méta base de données (Tableau 8) et nous avons par la suite extrait le changement relatif de rendement pour chaque zone et chaque scénario (avec parfois plusieurs scénarii, pays et cultures par étude). Afin d'éviter une surreprésentation de Schlenker et Lobell (2010), nous avons enlevé aléatoirement la moitié des points de cette étude qui représentait auparavant un tiers de la base de données. Il reste finalement 347 valeurs de changement de rendements issues des seize papiers. La part de chaque étude dans la base de données est décrite Figure 22. Il est important de noter que la référence temporelle peut varier légèrement d'un papier à l'autre (e.g. 1961-1990 pour Tingem et Rivington (2009) et 1960-2002 pour Schlenker et Lobell (2010)), ce qui peut mener, pour une même valeur de rendement futur à une valeur relative différente.

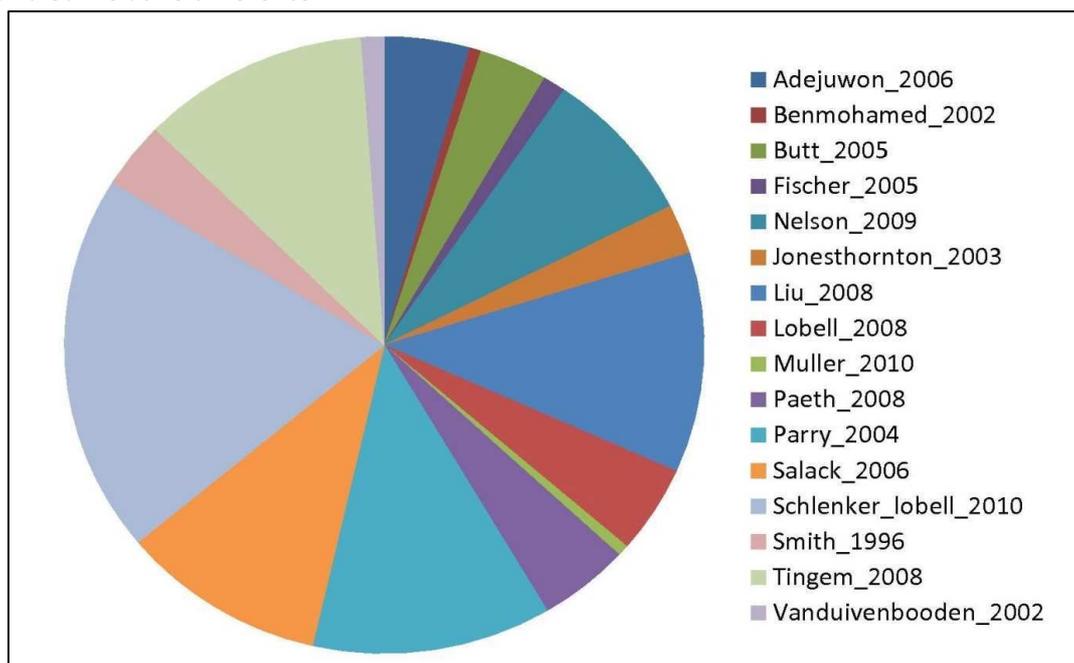


Figure 22: part de chaque étude dans la base de données créée

Source	Modèle climatique	Modèle agro	Scénario	Zone	Horizon	Culture	Ferti C?	Référence
Adejuwon (2006b)	HadCm2	EPIC	1%/an en CO ₂	Nigeria	2035/2055/2085	manioc, maïs, mil, riz, sorgho	oui	1960/1990
Ben Mohamed <i>et al.</i> (2002)	MAGICC+SCENGEN	empirique	-10% pluie; +10% tempé// -20%; +20%	Niger	2025	mil	non	1968/1998
Butt <i>et al.</i> (2005)	HadCm, CGCM	EPIC+PHYGROW +NUTBAL	Scénario "Greenhouse Gases Integrations"	Mali	2030	coton, niébé, arachide, maïs, mil, sorgho	oui	1960/1991
Fischer <i>et al.</i> (2005)	HadCm3,CSIRO, CGCM2,NCAR	AEZ+BLS	A2	ASS	2080	global	oui	1961/1990
Nelson <i>et al.</i> (2009)	NCAR, CSIRO	IMPACT+DSSAT	A2	ASS	2050	global, maïs , mil, riz, sorgho, blé, soja, arachide	oui /non	2000
Jones et Thornton (2003)	HadCM2	CERES-maïs	Introuvable	AO (détails)	2055	maïs	non	"1990 climate normals"
Liu <i>et al.</i> (2008)	HadCM3	GEPIC	A1FI, B1, A2, B2	ASS, AO (détails)	2030	global, manioc, maïs, mil, riz, sorgho, blé	oui	1990/1999
Lobell <i>et al.</i> (2008)	20 GCMs	empirique	A1B, A2, B1	AO	2030	manioc, arachide , maïs , mil, riz, sorgho, blé, igname	non	1998/2002
Müller <i>et al.</i> (2010)	CCSM3+ECHAM5+ ECHO-G+GFDL+HADCM3	LPJmL	A1B+A2+B1	AO	2050	global	oui /non	1996/2005
Paeth <i>et al.</i> (2008)	REMO	MOS (empirique)	B2	Bénin	2025/2020	haricots, manioc, coton, arachide, maïs, riz, sorgho, igname	non	1979/2003
Parry <i>et al.</i> (2004)	HadCM3	empirique+BLS	A1FI,A2A,A2B, A2C,B1A,B2A, B2B	AO	2020/2050/ 2080	global	oui /non	1990

Chapitre 2: Bilan de la littérature sur les changements climatiques passés et futurs en Afrique de l'Ouest et leurs impacts sur les rendements agricoles

Salack (2006)	Scénario	DSSAT 4	(+1°C, +1.5°C, +3°C)/ (+5%,+10%, +20%)	Niger/Burkina	2020/2050/ 2080	mil mtdo/zatib, sorgho	non	1961/1990
Schlenker et Lobell (2010)	16 GCMs	empirique	A1B	AO (détails)	2055	manioc, arachide , maïs, mil, sorgho	no	1960/2002
Smith <i>et al.</i> (1996)	CCCM, GFD3, GISS	DSSAT 3	2* CO ₂	Gambie	2075	arachide , maïs , mil tardif, mil précoce	yes	1951/1990
Tingem et Rivington (2009)	GISS, HadCM3	Cropsyst	A2, B2	Cameroun	2020/2080	"bambara nut", arachide , maïs, sorgho, soja	yes	1961/1990
Vanduivenbooden <i>et al.</i> (2002)	MAGICC+SCENGEN	empirique	-10% pluie; +10% temp// -20%; +20%	Niger	2025	niébé, arachide	no	1968/1998

Tableau 8: Paramètres utilisés dans les études sélectionnées dans cette revue. La "zone" citée signifie que nous considérons cette zone pour donner des résultats. "Détails" ajouté entre parenthèses signifie que nous détaillons les résultats pour cette zone à une échelle plus fine. AO: Afrique de l'Ouest, ASS: Afrique Sub Saharienne

Nous nous sommes par la suite particulièrement intéressés à certaines variables explicatives qui pourraient jouer sur l'amplitude et/ou le signe de la variation du rendement futur. Ainsi, cinq variables ont été sélectionnées:

- l'effet de fertilisation du CO₂. On classe alors les valeurs sélectionnées suivant si cet effet est pris en compte ou pas. La catégorie "avec effet CO₂" regroupe alors 157 points sur 347 et la catégorie "sans effet CO₂" 190 points.

- l'intensité du scénario de réchauffement. On déduit le forçage radiatif grâce au scénario SRES et à l'horizon temporel employés, en utilisant les données publiées par l'IPCC (http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/551.htm).

Remarquons que cette variable ne peut être utilisée que pour les études qui considèrent des scénarii SRES (10/16 et 221 points sur 347). Nous avons alors créé deux catégories en fonction de la valeur médiane du forçage. Les 221 points sont donc séparés en deux parts égales représentant un forçage radiatif faible (<3.9 W/m²) et fort (>3.9W/m²). Cette valeur médiane du forçage correspond à un réchauffement de 3°C de la température globale, pour une sensibilité moyenne du climat.

- le type de modélisation agronomique. On définit ici deux catégories conformément à la schématisation du processus de travail décrit Figure 21: modélisation empirique (149 points sur 347) et modélisation mécaniste (198 points sur 347).

- le type de culture. Les papiers sélectionnés considèrent généralement les cultures vivrières (principalement maïs, mil et sorgho). Comme très peu d'auteurs (Smith *et al.* (1996); Salack (2006)) détaillent les cultivars utilisés, seul le nom générique de la culture est précisé dans la base de données. Certaines études présentent les résultats en regroupant des types de cultures comme les "cultures majeures" pour Müller *et al.* (2010) ou "céréales" pour Fischer *et al.* (2005). Nous les regroupons dans la base de données sous le terme "global".

- la zone: certaines de ces études présentent des résultats agrégés au niveau du continent (Afrique Sub-Saharienne, "ASS") ou de la sous-région (Afrique de l'Ouest, "AO"), ou encore du pays. Nous avons séparé ces papiers s'intéressant aux pays en deux catégories géographiques selon un gradient climatique: la zone soudano-sahélienne regroupe le Niger, le Mali, le Burkina Faso, le Sénégal et la Gambie (126 points sur 347) et la zone guinéenne le Bénin, Togo, Nigéria, Ghana, Liberia, Sierra Leone, Cameroun, Guinée, Guinée Bissau, Côte d'Ivoire (101 points sur 347).

D'autres variables descriptives sont disponibles dans la base de données (Tableau 8): le nom des modèles climatiques, agronomiques, la période temporelle de référence pour le climat présent et l'horizon temporel futur.

4.1.3 La méta-analyse

L'évaluation de l'impact du changement climatique sur les rendements agricoles nécessite une méthodologie avec différentes étapes. A chacune de ces étapes, les choix effectués (*e.g.* le choix du modèle de climat) et la manière dont les différents composants sont liés les uns aux autres peuvent influencer les résultats finaux. La base de données constituée est donc utilisée pour évaluer l'incertitude structurelle dans les calculs sur l'évolution des rendements futurs en Afrique de l'Ouest. Des histogrammes représentant le changement relatif de rendement sont une manière d'évaluer visuellement les changements les plus fréquents et la dispersion des réponses au sein de la littérature. Ces histogrammes peuvent être réalisés pour l'ensemble de la base de données mais aussi pour des sous-échantillons définis par les variables explicatives décrites en section 4.1.2.

Les différences entre les distributions de ces sous-échantillons (par exemple entre modèles dynamiques et empiriques) peuvent illustrer l'importance de la variable concernée (le type de modèle) sur le signe, l'amplitude et l'incertitude de la variation de rendement projetée. Notons que comme la base de données contient des résultats hétérogènes venant de publications utilisant des méthodologies, des cultures et des zones relativement différentes, nous limiterons notre méta-analyse à une comparaison visuelle des résultats via les histogrammes et nous illustrerons les différences principales entre les études. En effet, nous ne disposons pas dans cette méta-analyse de suffisamment d'études pour pouvoir couvrir l'ensemble des combinaisons (pays, culture, horizon temporel) possibles avec un nombre de points conséquents. De plus, comme le soulignent Challinor *et al.* (2007), l'estimation de l'incertitude en utilisant un échantillon d'études d'impact sous-estime l'incertitude réelle.

4.2 Résultats

La Figure 23 présente tout d'abord la distribution des changements relatifs de rendement dus au changement climatique pour (i) toutes les simulations (toute la base de données, en trait plein) et (ii) les simulations ne considérant pas la fertilisation CO_2 (pointillés). La première distribution vise à donner une vue globale de toutes les valeurs trouvées dans la littérature alors que la seconde se concentre sur l'impact du climat uniquement. La Figure 23 révèle ainsi une large dispersion des réponses pour les deux distributions même si, globalement, les deux montrent une tendance négative: les valeurs médianes sont de -11% sans fertilisation CO_2 et de -5% avec. Afin de se focaliser particulièrement sur les impacts du climat, on considère par la suite uniquement les variations de rendement ne tenant pas compte de l'effet de fertilisation du CO_2 (190/357 points). Notons que les figures présentées dans cette section ont également été réalisées avec la base entière: la comparaison montre des tendances similaires. L'effet de fertilisation du CO_2 sera étudié séparément dans la section 4.2.6.

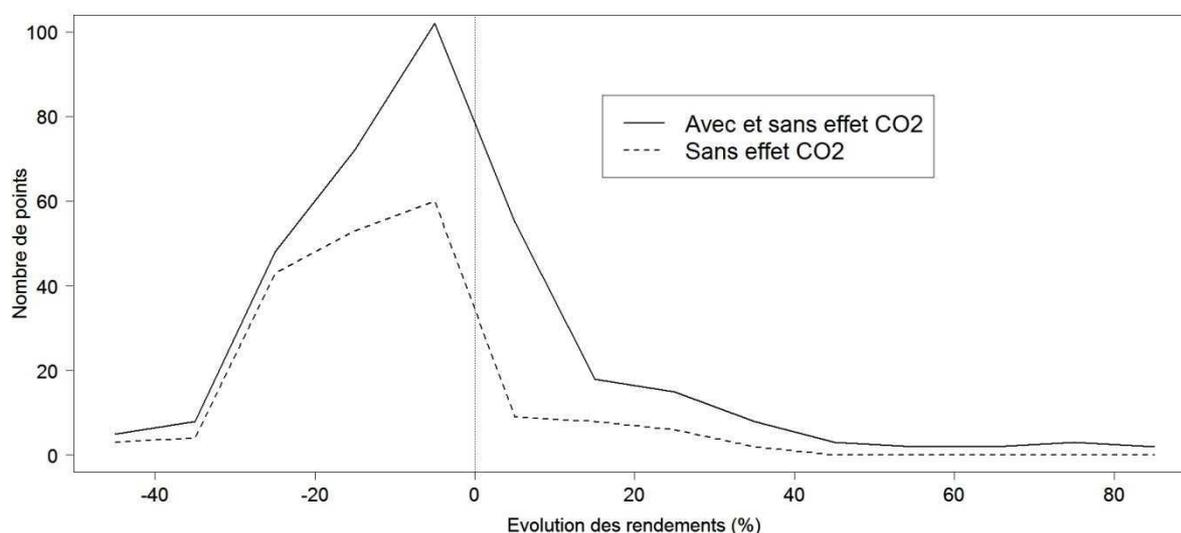


Figure 23: distribution des rendements futurs selon les 16 études sélectionnées (tous pays, cultures, horizons temporels, scénarii). La ligne pleine représente tous les 347 points et la ligne en pointillés seulement les points ne tenant pas compte de l'effet fertilisant du CO_2 (190 points).

4.2.1 Modèles agronomiques mécanistes vs modèles empiriques

Nous divisons la base de données sans effet fertilisant du CO₂ en deux groupes (Figure 24): les études utilisant des modèles agronomiques mécanistes (dynamiques) et celles utilisant les modèles empiriques (statistiques). Les médianes des deux distributions sont très proches (-11% pour les modèles empiriques vs. -13%). Ainsi, bien qu'elles soient de nature complètement différentes, les deux méthodes donnent des résultats similaires pour les rendements futurs. Cependant, les résultats issus des modèles mécanistes ont une dispersion plus importante, due aux multiples facteurs interagissant (*e.g.* changement dans la distribution des pluies, effets des températures extrêmes) alors que les méthodes statistiques sont beaucoup plus limitées et projettent des changements moins drastiques pour les rendements futurs.

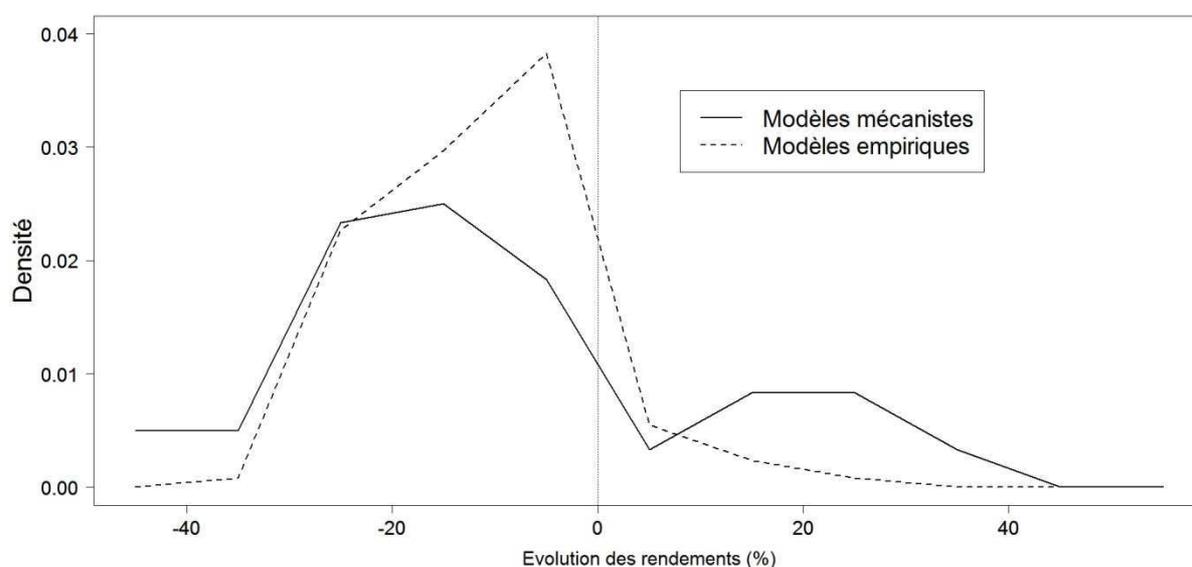


Figure 24: distribution des évolutions de rendements futurs calculés par les modèles agronomiques empiriques (pointillés) et mécanistes (trait plein)

4.2.2 Effet de l'amplitude du forçage radiatif

La base de données est divisée cette fois en deux catégories selon l'amplitude du forçage radiatif, un indicateur qui synthétise la capacité de réchauffement des gaz à effet de serre et des aérosols. Pour un modèle de climat donné, le forçage radiatif détermine la température moyenne. Mais cette dernière dépend également de la sensibilité du modèle de climat. Ainsi, diviser cette base de données par rapport au forçage radiatif donne une indication sur les bénéfices de l'atténuation du changement climatique. En effet, à cause de l'inertie du système climatique, un réchauffement important est inévitable et seule la réduction des émissions peut l'atténuer. Ainsi, les bénéfices de telles réductions sont mieux évalués en comparant les impacts d'un réchauffement modéré à ceux d'un réchauffement plus important qu'en comparant un scénario de non-réchauffement (qui est déjà hors de portée) et un quelconque scénario de réchauffement. La Figure 25 montre que l'évolution des rendements futurs est assez différente pour les deux différentes catégories de forçage. L'impact du changement climatique est clairement plus négatif pour le forçage le plus élevé (médiane=-15% vs. -6%). La dispersion de l'évolution des rendements est également plus grande pour le forçage radiatif élevé.

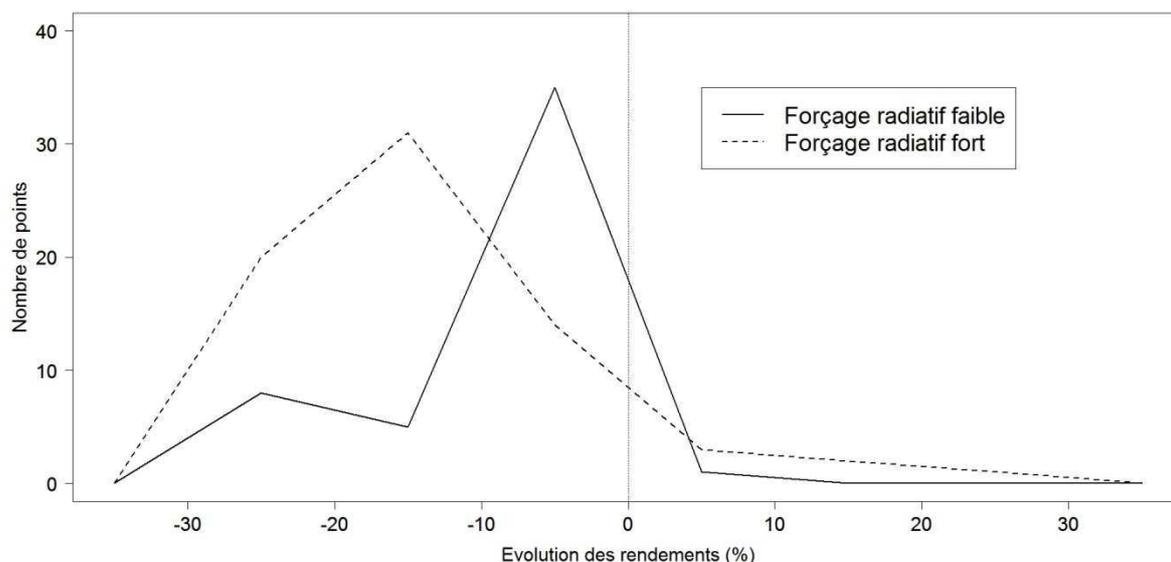


Figure 25: distribution des évolutions de rendements futurs pour un forçage radiatif faible (<3.9 W/m², trait plein) et fort (>3.9 W/m², pointillés).

4.2.3 Effet des changements de températures et de précipitations

Comme on l'a vu page 44, les changements de pluie et de température sont des facteurs explicatifs majeurs des tendances observées dans la production agricole en ASS. L'augmentation des températures et la baisse des pluies qui ont eu lieu par le passé ont conjointement mené à une diminution de la production depuis les années 70 (Barrios *et al.* (2008)). Si les changements dans la pluie ont eu dans le passé un impact plus important sur la production que les modifications des températures, cela pourrait être différent dans le futur. En effet, l'AR4 prévoit pour la période 2080/2099 en Afrique de l'Ouest, et pour le scénario A1B, une augmentation de température de +1.8°C à 4.7°C et une évolution du cumul pluviométrique annuelle de -9% à +13%. Comme le soulignent Schlenker et Lobell (2010) ces augmentations de température sont, en relatif, bien plus importantes que les changements de précipitation: ces derniers sont ainsi inférieurs à l'écart type de la pluviométrie passée, ce qui n'est pas le cas de la température. De plus Schlenker et Lobell (2010) ont montré que l'effet marginal sur les rendements d'un changement de l'ordre d'un écart-type (calculé sur les données observées) est bien plus faible pour les pluies que pour les températures.

En se fondant sur les résultats de cette étude, la Figure 26 tente d'évaluer l'impact respectif des changements de température et de précipitation sur les variations de rendements. Même si les pluies restent constantes, les rendements diminuent d'environ -15%. Cela est probablement dû au raccourcissement du cycle de croissance des cultures et à l'augmentation du stress hydrique via une évapotranspiration plus élevée. D'autre part, même si l'impact est plus faible que celui des températures, le changement de pluviométrie a aussi clairement un impact sur les rendements. La Figure 26 montre que le changement de rendement médian diffère d'un facteur deux lorsque la pluie augmente ou diminue (-10% et -21%, respectivement). De même, Salack (2006) montre pour une variété de mil qu'une augmentation de la pluie ne parvient pas à compenser totalement un réchauffement de +1.5°C mais l'atténue fortement (-59% et -26% pour une diminution et une augmentation de température, respectivement). Enfin, Fischer *et al.* (2002) soulignent que la production de blé, riz, et maïs varie peu lorsque la pluie augmente. Pour l'Afrique de l'Ouest, les changements relatifs de rendement pour les trois scénarii +2°C/+0%, +2°C/+5%, +2°C/+10% sont respectivement -13%, -13% et -12%.

Cependant, il est difficile d'évaluer les rôles respectifs des changements de température et de pluie sur les rendements futurs car ces deux variables sont intimement liées, comme le soulignent Douville (2006) qui démontrent sur le Sahel que des précipitations entraînent une baisse des températures de surface via l'évaporation de l'eau et la réduction des flux radiatifs due aux nuages. De plus, les effets des changements de température et de précipitation peuvent interagir. Par exemple, la combinaison de températures élevées et de fortes pluies entraîne des taux importants d'altération chimique et la lixiviation des sols argileux de faible fertilité (Barrios *et al.* (2008)).

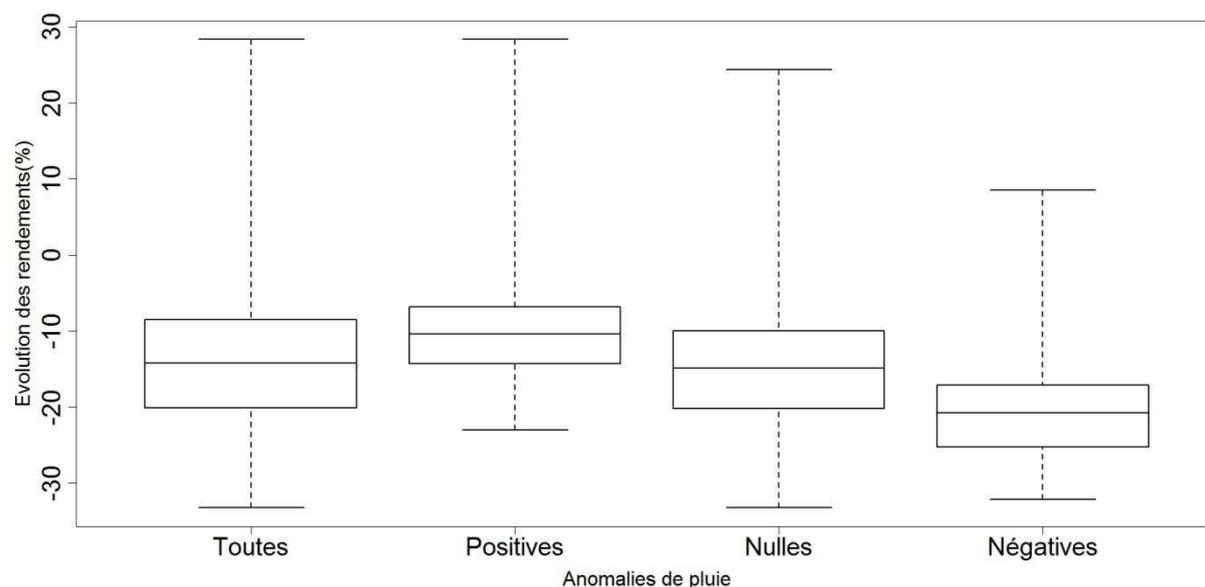


Figure 26: impact de la pluie sur les évolutions de rendement, en utilisant uniquement les données de Schlenker et Lobell (2010). La boîte "Toutes" représente les évolutions de rendement pour tous les points de l'étude, la boîte "Positives" seulement pour les points représentant un scénario avec anomalies de pluies positives ($\geq 5\%$), la boîte "Nulles" seulement pour les points représentant un scénario avec anomalies de pluies faibles ($-5\% ; 5\%$) et la boîte "Négatives" seulement pour les points représentant un scénario avec anomalies de pluies négatives ($\leq -5\%$). Dans Les boîtes, la ligne horizontale est la médiane, la borne inférieure est le 1er quartile, la borne supérieure le 3e quartile et les moustaches s'étendent aux extrema de la distribution.

4.2.4 Différences entre les zones soudano-sahéliennes et guinéennes

L'impact du changement climatique sur les rendements ouest-africains diffère entre le Sud (zone guinéenne) et le Nord (zone soudano-sahélienne) de la sous-région. La Figure 27 montre la distribution des évolutions de rendements pour les pays appartenant à chacune des deux zones. La diminution des rendements est plus importante pour les pays soudano-sahéliens (médiane=-18%) que pour les pays guinéens (-13%). Cette différence peut être expliquée par les projections du climat en Afrique de l'Ouest (voir section 3) qui indiquent un réchauffement plus marqué sur l'Afrique continentale (particulièrement le Sahel et le Sahara) que sur la zone guinéenne, influencée par l'océan. De plus, une augmentation de température a un impact significatif sur le bilan hydrique, ce qui peut avoir plus d'incidence en zone soudano-sahélienne où l'eau est souvent un facteur limitant, ce qui n'est pas le cas en zone guinéenne.

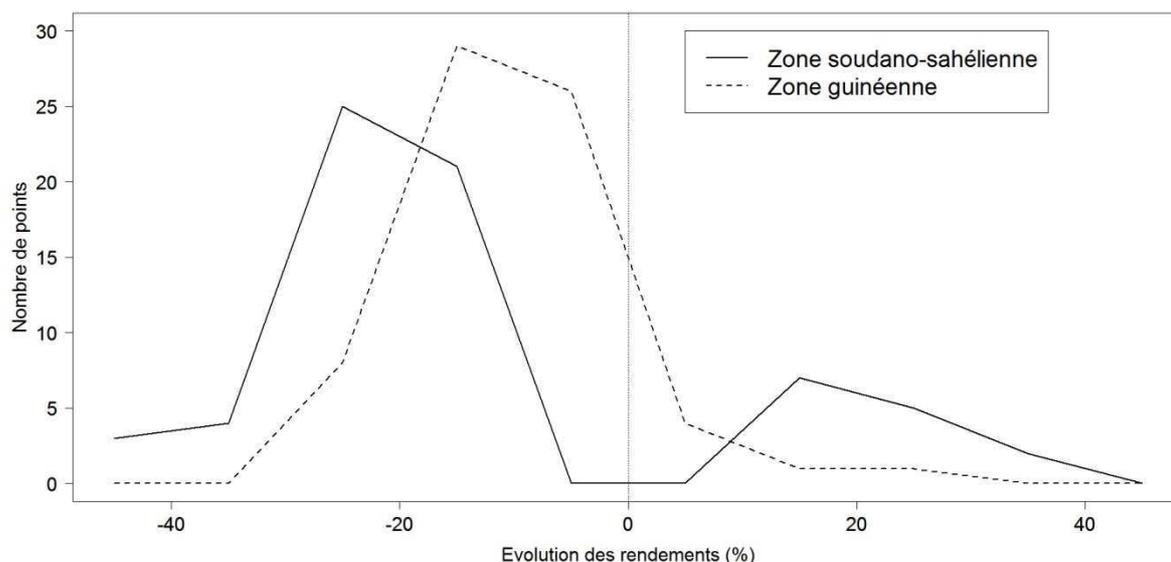


Figure 27: distribution des évolutions de rendements futurs pour la zone guinéenne (pointillés) et soudano-sahélienne (trait plein).

4.2.5 Différences entre les cultivars

La plupart des études sélectionnées s'intéresse à une ou plusieurs cultures sans spécifier quel cultivar est utilisé. Cependant, dans la réalité, les agriculteurs sélectionnent des variétés adaptées aux conditions climatiques (*e.g.* du mil tardif ou précoce). En effet, les caractéristiques des cultivars peuvent être assez différentes (*e.g.* longueur de cycle, photopériodisme, résistance à la sécheresse) et leurs réactions aux changements du climat également. Ainsi, Smith *et al.* (1996) et Salack (2006) montrent que les rendements futurs du mil varient fortement selon la variété (de -44% à -29% pour le mil précoce et de -21% à -14% pour le mil tardif). Il semble donc fondamental que les études futures prennent en compte différents cultivars contrastés ou, au moins, définissent clairement ceux qu'elles emploient pour permettre une comparaison des résultats.

4.2.6 Effet fertilisant du CO₂

L'augmentation des concentrations de CO₂ de l'atmosphère est à l'origine de l'augmentation du forçage radiatif qui produit un impact négatif sur les rendements agricoles de cette région via l'augmentation de la température et les modifications de la pluviométrie. Cependant, une concentration élevée de CO₂ a également un effet physiologique bénéfique sur les cultures à travers la stimulation de la photosynthèse et la réduction du stress hydrique grâce à une plus faible conductance stomatique (Tubiello *et al.* (2007b); Leakey (2009)). En effectuant une comparaison entre l'évolution des rendements avec et sans effet fertilisant du CO₂, Müller *et al.* (2010) concluent que la plus grande source d'incertitude dans la quantification de ce type d'impact est l'effet du CO₂. Ils trouvent une augmentation de +8% en Afrique (changement en 2046/2055 par rapport à 1996/2005) en prenant en compte l'effet fertilisant du CO₂ et de -8% en n'en tenant pas compte. Cependant, d'autres études montrent des différences plus basses entre les scénarii avec et sans effet CO₂. Finalement, les effets semblent être moins importants lorsqu'on considère des horizons temporels plus proches, des scénarii d'émissions modérées et des cultures en C4. Par exemple, Parry *et al.* (2004) ne trouvent pas une différence importante en 2020 entre les scénarii avec et sans effet CO₂, alors que la différence est bien plus importante en 2080.

Dans cette section, on étudie quantitativement l'effet fertilisant du CO₂, en étudiant uniquement les papiers qui donnent des résultats avec et sans cet effet. La Figure 28 montre que la différence entre les deux hypothèses dépend fortement des paramètres considérés (type de culture,

horizon temporel, scénario d'émission). La différence est particulièrement importante pour les cultures en C3 (e.g. soja, arachide) et pour les situations avec de hautes concentrations en CO₂: typiquement à la fin du XXIe siècle et pour des scénarii SRES de type A. De plus, dans certains cas, l'effet fertilisant du CO₂ peut compenser la baisse de rendement due au climat et peut même l'inverser (Figure 28). Notons que le point du graphique qui indique une absence de différences entre les deux situations vient de Parry *et al.* (2004) qui utilisent des échelles de couleurs pour leurs résultats. Cela signifie donc simplement que les points sont dans la même catégorie ([-30%;-10%]).

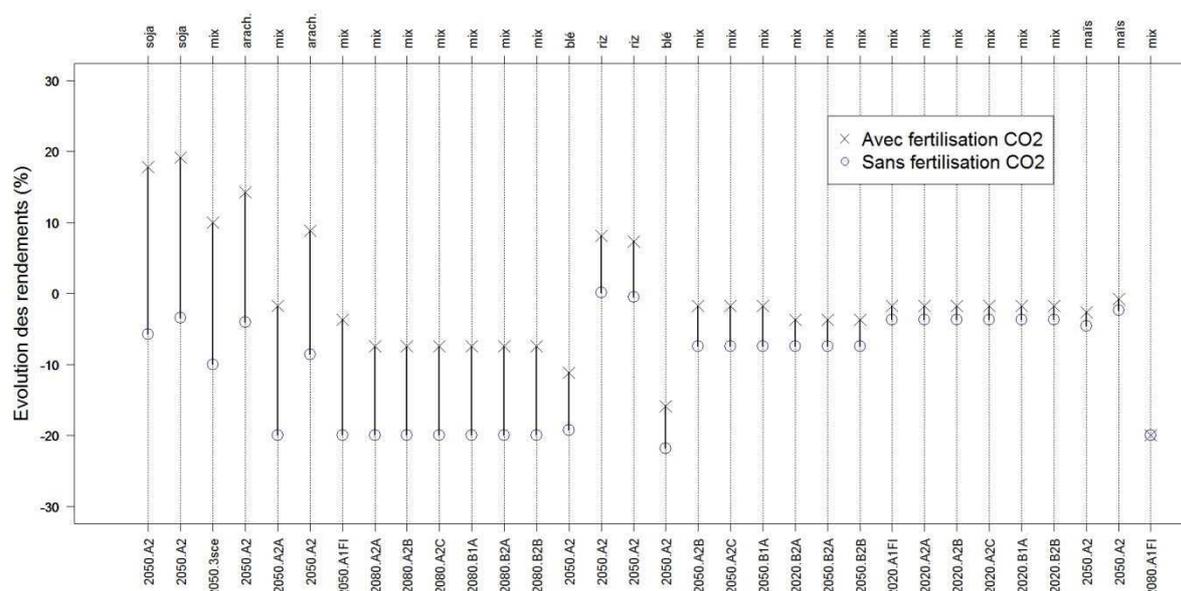


Figure 28: différences d'évolution des rendements futurs entre les simulations prenant en compte l'effet fertilisant du CO₂ et celles ne le prenant pas en compte, au sein d'une même étude. "mix" est pour un mélange de cultures comme "céréales" ou "cultures majeures".

4.2.7 Résultats concernant les variables monétaires

Un autre moyen d'analyser l'impact du changement climatique sur l'agriculture est de chercher une relation statistique entre le climat local (généralement représenté par la pluie saisonnière et la température) et des variables monétaires comme la valeur de la production, le revenu de l'exploitation ou la valeur des terres agricoles. C'est la base de la méthode dite ricardienne, introduite par Mendelsohn *et al.* (1994) pour les Etats-Unis et appliquée depuis à l'Afrique, par exemple par Ajetomobi *et al.* (2010), Hassan (2010), Kurukulasuriya et Mendelsohn (2007), Kurukulasuriya et Mendelsohn (2008), Molua (2009) et Nhemachena *et al.* (2010). De plus, Seo *et al.* (2009) ont étudié récemment l'impact sur le revenu agricole en combinant la méthode des zones agro-écologique (AEZ) avec l'approche ricardienne. Comme on l'a déjà précisé, nous détaillons ces résultats dans cette section plutôt que de les mélanger avec le reste de la base de données car ils concernent des variables monétaires et non des grandeurs physiques comme les rendements agricoles. De plus, dans certaines études, les résultats ne sont pas exploitables: ils sont pour l'Afrique dans sa globalité, ou ils ne permettent pas de calculer une variation relative. L'étendue des résultats de l'analyse ricardienne est très importante, même au sein d'une seule étude. Par exemple, selon Kurukulasuriya et Mendelsohn (2007) la variation du revenu moyen en 2100 en Afrique est comprise entre -34% et +66%, en fonction du GCM. Pour le Cameroun en 2100, Molua (2009) trouve également une large gamme de valeurs allant de -50% à +38%, en fonction du GCM et pour le scénario B2. Hassan (2010) et Seo *et al.* (2009) trouvent de même des résultats contrastés. Cette dispersion dans les résultats peut être due à des différences dans les projections des GCMs mais également à la sensibilité de la méthode ricardienne à la pluie. En effet, Ajetomobi *et al.* (2010) montrent avec le riz au Nigeria qu'une baisse de 5% des pluies entraîne une baisse de 65% du revenu

pour les exploitations sans irrigation, alors que +2°C induit seulement une baisse de 12%. De plus, l'analyse ricardienne peut prévoir dans certain cas des changements beaucoup plus positifs que les autres méthodes car elle considère une adaptation totale. Finalement, à cause de cette grande dispersion dans les résultats, il n'est pas encore possible de tirer une conclusion sur les tendances futures en utilisant l'analyse ricardienne.

5. Résumé et conclusions du chapitre

5.1 Sur le climat passé et futur en Afrique de l'Ouest

En Afrique de l'Ouest, les exploitations agricoles sont généralement familiales avec une faible intégration au marché, peu d'intrants et un faible taux de mécanisation. De plus les cultures sont généralement pluviales (mil, sorgho, maïs, arachide) et sont donc potentiellement vulnérables aux baisses (ou aux excès) de pluviométrie, ce qui a été malheureusement illustré par les crises pluviométriques et alimentaires des années 73/74 et 83/84 par exemple. Si la pluie est le paramètre qui paraît le plus lié aux variations de rendement, les agriculteurs soulignent également l'influence d'autres facteurs climatiques comme la température et le vent. Pour eux, les aspects climatiques jouent globalement entre 30 à 50 % dans la baisse des rendements des cultures pluviales, selon les zones d'études. La pluie joue finalement lorsqu'on s'intéresse à la variabilité interannuelle des rendements alors que les variations de température influencent plutôt les rendements moyens, sur une plus longue période.

Si la production agricole dans la sous-région a pu croître dans les dernières décennies de manière à satisfaire globalement la demande, cela s'est fait plutôt par extension des terres cultivées (arrêt des jachères, déforestation...) que par une augmentation des rendements (cela est spécialement vrai pour des pays comme le Niger). Cependant, ce procédé n'est pas reproductible à l'infini, induit une baisse de fertilité des terres (arrêt des jachères) et une pression importante sur l'environnement (perte de biodiversité, ruissellement). Le poids du climat sur la production agricole future risque donc de s'alourdir lorsque l'extension des terres cultivées ne sera plus possible. Il semble donc pertinent d'étudier les évolutions potentielles du climat futur pour pouvoir en déduire par la suite l'impact sur la production agricole. Ainsi, si les variations de la température et de la pluviométrie ont été importantes durant le XXe siècle, elles restent relativement modérées comparées au futur prévu par les modèles climatiques, surtout au niveau de la température: il est en effet prévu que celle-ci augmente entre +2°C à +6°C en 2100 (tous scénarii d'émissions confondus) alors qu'elle n'a augmenté que de 1°C au XXe siècle. L'évolution de la pluviométrie est quant à elle plus incertaine et pourrait aussi bien diminuer qu'augmenter, selon les modèles employés. Cependant, ceux-ci semblent en accord sur une modification de la répartition des pluies dans la saison avec un début de saison plus sec et une fin plus humide. Les changements climatiques semblent donc relativement importants, notamment en fin de siècle pour les températures. Il est donc fondamental d'étudier l'impact de ces changements sur les futurs rendements des cultures.

5.2 Sur les rendements agricoles futurs

L'évaluation des impacts du changement climatique sur l'agriculture s'avère être un réel défi pour plusieurs raisons: (i) les grandes incertitudes dans les projections du climat à l'échelle régionale, (ii) la réponse des cultures à la modification de certains paramètres environnementaux (pluie, température, concentration en CO₂), (iii) le couplage entre modèles climatiques et modèles agronomiques et (iv) l'adaptation des systèmes cultureux à un changement climatique progressif.

Quantifier de tels impacts nécessite une méthodologie particulière où les choix initiaux (par exemple celui du modèle de climat) peuvent influencer grandement le signe et l'amplitude de la variation de rendement. Ainsi, pour obtenir un signal robuste de l'impact du changement climatique,

il est nécessaire de choisir plusieurs méthodes et scénarii. En combinant les résultats de 16 études différentes, cette revue donne une idée du signe, de l'amplitude et de l'incertitude des impacts sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest.

Même si la dispersion des résultats concernant l'évolution des rendements futurs s'étend d'une perte de -50% à un gain de +90% (toutes cultures, pays, horizons temporels, scénarii), la valeur médiane de cette distribution indique une baisse des rendements de -11%. Cet impact négatif semble relativement robuste au type de modèle agronomique employé puisqu'il est observé aussi bien avec des modèles agronomiques empiriques que mécanistes. Les pays de la zone soudano-sahélienne semblent plus affectés par le changement climatique (médiane=-18%) que ceux de la zone guinéenne (médiane=-13%). De plus, nous montrons que les scénarii avec un forçage radiatif (et donc un réchauffement) important engendrent des pertes de rendements plus élevées (médiane=-15%) que les scénarii modérés (médiane=-6%). Cette différence souligne l'intérêt potentiel pour l'agriculture qu'aurait l'atténuation du changement climatique.

Ce signal négatif dans l'évolution des rendements futurs est en partie dû à l'augmentation de la température future qui diminue le cycle de croissance des cultures et augmente le stress hydrique via une évapotranspiration plus élevée. La pluie joue également un rôle non négligeable, et son évolution future peut aggraver (si baisse des précipitations) ou atténuer (si augmentation) cette évolution négative des rendements. Cependant, malgré l'importance de ces deux variables, on a vu que les futurs scénarii climatiques produits par l'IPCC restent assez divergents sur l'Afrique de l'Ouest, particulièrement pour la pluie. Pour la température, même si un réchauffement futur est indiscutable, l'amplitude de celui-ci reste à préciser. Ainsi, on voit que la précision de telles études d'impact dépend clairement de la capacité des GCMs à réduire l'incertitude dans les projections du climat futur.

Cette méta-analyse souligne également le rôle central de l'effet fertilisant du CO₂ sur le signe et l'amplitude des variations de rendements futurs. Si l'impact du changement climatique sur les cultures est essentiellement négatif lorsqu'on ne considère pas cet effet fertilisant, les scénarii le prenant en compte sont plus optimistes. Cependant, l'effet du CO₂ est difficile à estimer correctement et à paramétrer dans les modèles agronomiques (Long *et al.* (2006); Tubiello *et al.* (2007b); Ainsworth *et al.* (2008); Müller *et al.* (2010)). La récente revue de Leakey (2009) estime de plus que les évaluations de rendements tenant compte de l'effet positif du CO₂ sur les rendements seraient probablement trop optimistes, spécialement pour les plantes en C4 (principalement, en Afrique, le mil, le sorgho et le maïs). Leur photosynthèse ne semble en effet pas stimulée directement par une élévation de la concentration en CO₂ (Ghannoum *et al.* (2000); Leakey (2009)). De plus, la qualité des cultures pourrait décroître avec un effet décuplé du CO₂, à cause notamment d'une baisse dans la teneur en protéines (Taub *et al.* (2008)) et d'une moindre tolérance aux attaques des insectes (*e.g.* Dermody *et al.* (2008), Zavala *et al.* (2008)). Afin de pouvoir évaluer de façon plus précise les rendements futurs, il est de ce fait fondamental pour la recherche d'approfondir la connaissance de l'effet du CO₂ sur les cultures en C4 en Afrique de l'Ouest.

Un autre type d'études, fondé sur l'analyse ricardienne, considère une adaptation totale des exploitations et se focalise sur la valeur économique des terres agricoles ou du revenu de l'exploitation, et non sur les rendements. Pour cette raison, mais également parce que les études ricardiennes sélectionnées donnent parfois des résultats uniquement sur l'Afrique dans sa globalité, nous présentons ces résultats séparément. Ces études révèlent une grande dispersion des résultats, même au sein d'un même papier: c'est pourquoi il n'est pas possible pour le moment de dresser une conclusion fondée sur ces valeurs.

Finalement, et comme le soulignent Challinor *et al.* (2007), la comparaison directe entre de telles études d'impacts est une tâche ardue. Les papiers embrassent une gamme d'échelles, de cultures et de pays très différents, ce qui s'ajoute à l'incertitude provenant de diverses sources (modèles climatiques et scénarios, modèles agronomiques, descente d'échelle). Ainsi, la combinaison de différentes études d'impact de ce type est une première étape vers l'estimation du signe, de l'amplitude et de l'incertitude de l'impact du changement climatique sur les rendements. Mais cela n'est pas suffisamment précis. Comme préconisé par Challinor *et al.* (2007), une approche utilisant

divers GCMs, scénarii d'émissions, modèles agronomiques (avec différents ensembles de paramètres pour les processus clefs) et techniques de descente d'échelle permettrait une avancée dans l'évaluation de l'incertitude générée par la projection de rendements futurs. Parmi les points énoncés avant, il paraît particulièrement important de s'intéresser aux différences entre les modèles agronomiques et entre les méthodes de descente d'échelle. En effet, l'incertitude créée par ces paramètres a rarement été étudiée alors que Mall *et al.* (2007) ont trouvé sur l'Inde des différences importantes entre les modèles agronomiques empiriques et dynamiques et Ducharne *et al.* (2009) entre les méthodes de descente d'échelle (étude d'impacts hydrologiques).

Réaliser une telle approche multi-ensembles pour évaluer les impacts du changement climatique sur l'agriculture africaine serait donc particulièrement pertinente, et est entre autre l'objet du nouveau projet AgMIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project), qui cherche à réaliser ce genre de travail pour toutes les régions du monde.

Chapitre 3: Impact du climat futur sur les rendements de différentes variétés de sorgho et mil en Afrique de l'Ouest: résilience des variétés locales

Communications relatives à ce chapitre:

- Sultan B., Roudier P., Baron C. (2011) The impact of climate change on the main staple crops in West Africa. AGU 2011 Fall meeting, San Francisco, USA.
- Sultan, B., Roudier, P., Baron, C., Quirion, P., Muller, B., Alhassane, A., Ciais, P., Guimberteau, M., Traoré, SB., Dingkuhn, M. (forthcoming). Traditional West African cultivars are less vulnerable to climate change. Soumis à *PNAS*

Résumé:

Dans ce chapitre, nous étudions les rendements futurs de deux céréales en Afrique de l'Ouest en créant un jeu de 35 scénarii climatiques, différents des scénarii utilisés avec les GCMs puisque fondés sur sept anomalies de température (+0°C à +6°C) et cinq de pluie (-20% à +20%). Pour chacun de ces scénarii, nous simulons alors avec le modèle SARRA-H les rendements de six variétés contrastées de mil et de sorgho, sur 35 stations réparties en Afrique de l'Ouest.

Les résultats montrent que le rendement moyen des céréales décroît avec l'augmentation de la température et la diminution des pluies. La plupart des scénarii (31/34) prévoit une décroissance du rendement moyen pouvant aller jusqu'à -41% (scénario +6°C/-20%). Cette évolution négative des rendements moyens est due principalement à l'augmentation de température. L'évolution positive (négative) du cumul pluviométrique peut toutefois atténuer (aggraver) cette décroissance des rendements moyens. Celle-ci est due principalement à une augmentation de la demande climatique (ETo: +8% en moyenne pour le scénario +4°C), à une augmentation de la respiration de maintenance par unité de biomasse (+30%) et à un raccourcissement du cycle des cultures (-10 jours). Si on s'intéresse aux climats futurs issus de 22 GCMs et trois scénarii d'émission pour les horizons 2040 et 2080, on voit qu'aucune évolution positive de rendement moyen n'est prévue.

On s'intéresse par la suite à la variabilité interannuelle des rendements, via l'étude du Coefficient de Variation (CV). Si les variations du CV semblent en premier lieu décrire dans un bon nombre de cas une évolution positive (*i.e.* baisse de variabilité interannuelle), 17 scénarii sur 34 donnent des valeurs pour le CV qui ne sont pas statistiquement différentes (à 5%) du scénario de référence. Les valeurs significativement différentes sont quant à elles quasiment toutes (15/17) négatives (*i.e.* augmentation du

CV). Le futur hypothétique prévu par les GCMs est donc caractérisé par peu d'évolution du CV, ou dans une moindre mesure une augmentation de celui-ci, spécialement pour l'horizon 2080.

D'autre part, ces impacts ne sont pas répartis de façon homogène dans toute la sous région. Si on considère que les cinq scénarii de pluie sont équiprobables, la probabilité (par exemple pour +4°C) d'avoir des baisses de rendement inférieures à -10% est beaucoup plus forte dans le Sud de la zone.

Enfin, les variétés ont des réactions différentes aux scénarii climatiques. L'impact est en effet plus négatif pour les sorghos et mils à cycle court et constant que pour les variétés photopériodiques (-28% vs -40% pour le scénario +4°C/-20%). Les variétés photopériodiques ayant une partie de leur cycle insensible à la température, la diminution de la longueur de cycle est plus minime et les pertes de rendement aussi.

1. Introduction

Nous avons souligné dans le chapitre précédent plusieurs points qu'il convenait d'approfondir dans la projection de rendements futurs en Afrique de l'Ouest. Parmi eux, nous avons vu notamment que (i) les études d'impact se limitent en général à un ensemble de modèles et de scénarii climatiques trop restreints, (ii) les cultures sont modélisées en considérant uniquement une variété générique alors que les agriculteurs sélectionnent en réalité différents cultivars selon leur environnement, (iii) les résultats obtenus ne sont pas homogènes spatialement sur toute la sous-région et (iv) les rôles respectifs de la pluie et des températures sur les évolutions des rendements futurs méritent une plus grande attention.

Afin de développer ces quatre points, nous définissons tout d'abord un grand nombre de scénarii climatiques fondés sur des évolutions de pluies et de température, afin de simuler via un modèle agronomique mécaniste l'impact du climat futur sur le mil et le sorgho, deux des principales cultures vivrières en Afrique de l'Ouest (64% de la production totale de céréales, données FAOSTAT). Chacune de ces deux cultures est représentée par plusieurs variétés dont nous étudierons les différences de réaction. Enfin, le grand nombre de stations réparties sur toute l'Afrique de l'Ouest nous permet d'étudier les particularités spatiales et notamment les différences nord/sud. Tout au long de cette étude, nous nous efforcerons également de discuter le rôle relatif des pluies et des températures sur les rendements afin de déterminer si le rôle prépondérant joué par la température (chapitre 2) se confirme ici. Notons qu'on ne tiendra pas compte de l'effet fertilisant du CO₂ atmosphérique sur les rendements. Si on a vu dans le chapitre précédent que cela pouvait avoir un impact notable sur le signe et l'amplitude des résultats, on a également souligné que cet effet était beaucoup plus marginal pour les cultures en C4 comme le mil et le sorgho. De plus, nous ne nous fondons pas ici sur des scénarii d'émissions standardisés (comme les scénarii SRES), ce qui ne nous permet pas d'évaluer la concentration en CO₂.

2. Zone et méthodologie

2.1 Zone et variétés choisies

2.1.1 Zone

Nous nous focalisons ici sur certains pays d'Afrique de l'Ouest (Mauritanie (Sud), Sénégal, Mali, Burkina Faso, Gambie, Guinée (Nord), Guinée Bissau, Bénin (Nord) et Togo (Nord)). Si les 35 stations météorologiques dont nous disposons sur ces pays connaissent des climats contrastés notamment au niveau de la pluviométrie (Figure 29), nous n'avons pas choisi de stations très au Nord ni très au Sud pour éviter les situations extrêmement sèches et humides. Ainsi, nous avons éliminé deux stations au Nord du Mali puisque les rendements étaient trop fréquemment proches de zéro. Nous disposons pour ces 35 stations des données nécessaires afin de simuler les rendements avec le modèle SARRA-H, (données IRD, voir chapitre 1).

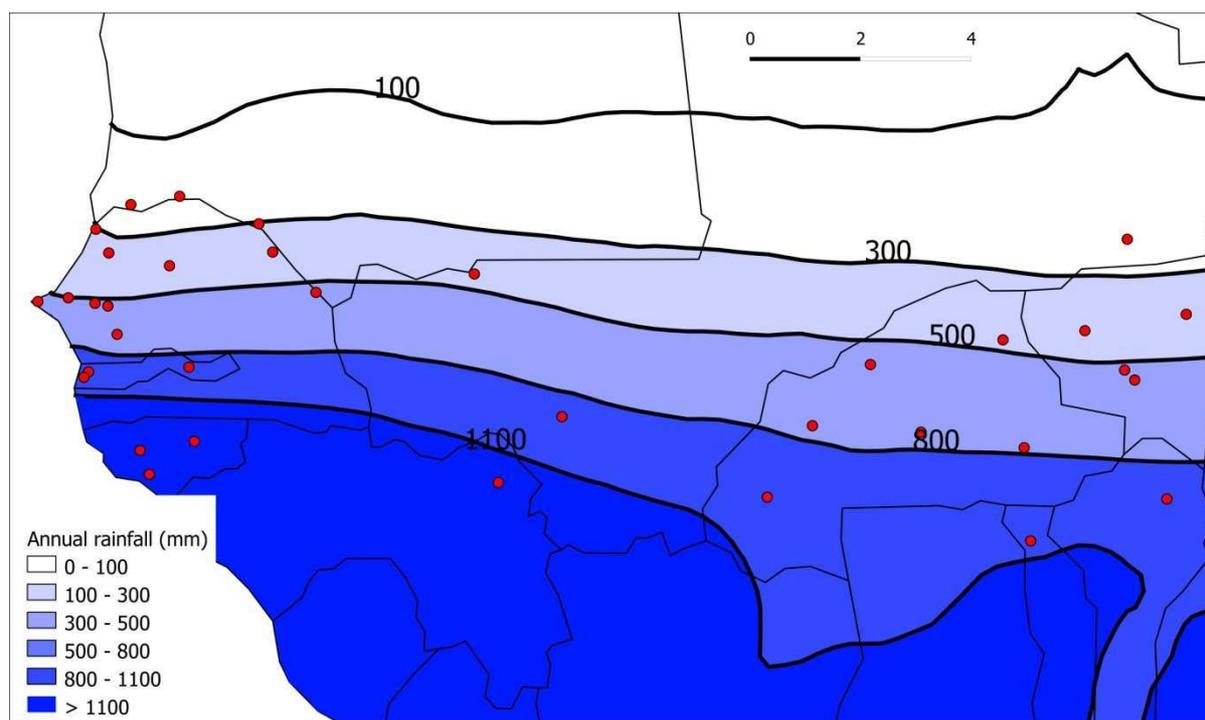


Figure 29: 35 stations synoptiques sélectionnées pour l'étude (1961/1990)

2.1.2 Variétés choisies et leurs principales caractéristiques

On a vu auparavant qu'il était nécessaire de considérer plusieurs cultivars pour une même culture afin d'étudier les différentes réactions potentielles. Ainsi, nous avons sélectionné trois variétés de mil et trois de sorgho parmi celles ayant été modélisées pour SARRA-H (voir page 33). Notre choix s'est fondé sur trois paramètres principaux des cultures:

- la sensibilité à la photopériode, *i.e* la capacité des variétés à adapter leur longueur de cycle afin de fleurir tous les ans approximativement à la même date (Dingkuhn *et al.* (2006)). Les variétés les plus photosensibles n'épient ainsi que si la durée journalière d'éclairage est inférieure à 12h (Vaksmann et Traoré (1994)). Ce paramètre est caractéristique des variétés locales et leur permet notamment de bien résister à la sécheresse (Traoré *et al.* (2000)) et d'éviter les pertes en fin de saison dues à un excès d'eau (Traoré *et al.* (2007)). Les variétés locales des céréales africaines possèdent ainsi un photopériodisme parmi les plus forts du monde. Dans le modèle SARRA-H, la variation de la longueur de cycle est due à une phase en particulier, (PSP, voir chapitre 1), dont la longueur varie en fonction de la photopériode et qui est donc moins sensible à la température. La gamme de variation autorisée (*i.e.* le fait d'être plus ou moins photopériodique) est dirigée par un coefficient de sensibilité au photopériodisme, calibré empiriquement.

- la longueur de cycle: ce paramètre différencie fortement les variétés qui peuvent ainsi être adaptées à des saisons plus ou moins longues (et donc plus ou moins humides).

- le rendement moyen: c'est la production moyenne interannuelle de la variété, qui est souvent le paramètre sur lequel la sélection variétale se focalise.

Pour le mil et le sorgho, nous avons donc choisi trois cultivars contrastés au regard de ces paramètres, comme le souligne le Tableau 9 qui renseigne leurs caractéristiques simulées par SARRA-H (moyenne sur 35 stations et sur 1961/1990). Pour chacune de ces deux céréales, nous avons donc sélectionné (i) un cultivar à cycle long, forte sensibilité à la photopériode et rendement relativement modéré (mil: somno (MTDO), sorgho: Kénikéba), (ii) un cultivar à cycle court (mil: souna III, sorgho: CSM 63), de longueur pratiquement constante et à fort potentiel de rendement et (iii) un cultivar aux caractéristiques à mi-chemin entre les deux précédents (mil: HKP, sorgho: Timari).

Notons que les cultivars souna III et CSM 63, qui ont le meilleur rendement potentiel, le cycle le plus court et un faible photopériodisme sont des variétés introduites par la recherche agronomique qui cherchait à avoir de meilleur rendement moyen et un cycle plus court pouvant avoir une production correcte même en cas de saison pluvieuse courte. Ces variétés, à cause de la variabilité de leur rendement, n'ont pas connu le succès escompté en Afrique de l'Ouest où les agriculteurs cherchent à minimiser le risque de mauvaises récoltes plutôt que maximiser leur revenu moyen (de Rouw (2004)). Cela est spécialement vrai pour souna III. Ainsi, les variétés qui minimisent, station par station, la variabilité interannuelle (étudiée via le Coefficient de Variation $CV = \frac{\text{écart-type}}{\text{moyenne}}$) sur la période 1961/1990 sont, très majoritairement, HKP pour le mil (30 stations sur 35) et le sorgho timari (26 stations sur 35). Le cultivar souna III ne minimise le CV pour aucune station et CSM 63 pour 8 stations.

Culture	Variété	Sensibilité à la photopériode	Ecart-type de la longueur de cycle	Longueur de cycle moyenne (jours)	Rendement moyen (kg/ha)
mil	HKP	Moyenne	17	112	1030
sorgho	Kénikéba	Forte	28	137	1150
sorgho	Timari	Moyenne/forte	21	119	1380
mil	Somno (MTDO)	Forte	24	126	1230
mil	Souna III	Faible	6	79	1820
sorgho	CSM 63	Faible	9	95	1660

Tableau 9: caractéristiques des trois cultivars de mil et de sorgho choisis. Les valeurs sont issues des simulations de SARRA-H sur la période 1961/1990 (moyenne sur 35 stations et 30 ans)

2.2 Scénarii climatiques

2.2.1 Définition

- Choix des variables

Nous cherchons dans un premier temps ici à définir les variables sur lesquelles les scénarii vont se fonder. Si on a vu que de nombreux facteurs peuvent influencer les rendements des cultures, comme la fertilité des sols ou les pertes dues aux facteurs biotiques (ravageurs, parasites), nous ne nous intéressons ici qu'aux facteurs climatiques. D'après Le *Mémento de l'agronome* (CIRAD *et al.* (2004), p.436), si "la production de biomasse des cultures est a priori issue du rayonnement [solaire (qui fournit l'énergie nécessaire)], l'alimentation hydrique conditionne pour une bonne part l'efficacité avec laquelle la photosynthèse pourra se réaliser". L'alimentation hydrique en un lieu donné est quant à elle régie par plusieurs facteurs incluant le sol, le type de couvert végétal et le climat, qui joue sur l'apport d'eau via les précipitations et la perte d'eau via l'évapotranspiration potentielle (ET_o). L'ET_o est quant à elle influencée par la température, la vitesse du vent, le rayonnement et l'humidité de l'air. Selon Fischer *et al.* (1996), parmi toutes ces variables, les trois principaux facteurs climatiques influençant les rendements sont finalement la température, la radiation solaire et les précipitations. Afin de ne pas avoir un nombre trop important de scénarii, ce qui augmenterait considérablement les temps de calcul et rendrait la présentation des résultats plus difficile, nous considérons finalement pour nos scénarii climatiques futurs uniquement les précipitations et les températures. En effet, nous étudions ici des systèmes de cultures non-irrigués où l'eau est le facteur limitant, ce qui donne un poids plus négligeable à la radiation solaire par rapport au bilan hydrique, et plus précisément à la pluie. De plus, si la température influe sur l'ET_o,

elle a également un rôle prépondérant dans la longueur de cycle de développement des cultures (voir page 31). Notons finalement que la pluie et la température, qui sont deux paramètres sur lesquels la recherche agronomique se focalise pour élaborer de nouveaux cultivars (Barnabas *et al.* (2008)), ont été déjà employées dans certaines études d'impact qui ont montré leur rôle important dans la variation des rendements (Roudier *et al.* (2011a); Müller *et al.* (2011)). Rappelons qu'on ne tient pas compte ici de l'effet fertilisant d'une élévation de la concentration de CO₂ atmosphérique. Nous ne faisons en effet pas d'hypothèses sur les scénarii d'émission ni sur les horizons temporels: la concentration en CO₂ est donc inconnue. Ce choix a pour but de se concentrer uniquement sur l'impact du climat représenté par deux variables. De plus, on a vu que l'effet fertilisant du CO₂ sur les cultures C4, comme le mil et le sorgho, est très marginal.

- Les différentes méthodologies d'élaboration des scénarii de pluies et températures

Ainsi, nous nous sommes fondés sur les projections du dernier rapport de l'IPCC (IPCC (2007b)) pour établir la gamme de changement étudiée pour chacune des deux variables. Nous avons donc construit un ensemble 35 scénarii en combinant cinq changements de précipitations potentiels [-20%, -10%, 0%, +10%, +20%] et sept évolutions de températures [+0°C, +1°C, +2°C, +3°C, +4°C, +5°C, +6°C]. Afin de créer ces scénarii, nous utilisons comme base les données météorologiques journalières dont nous disposons sur 1961/1990. Pour les 35 scénarii, nous modifions les chroniques de pluies et de températures selon différentes méthodes afin d'aboutir à l'anomalie considérée. Les quatre méthodes testées sont les suivantes:

- la méthode des deltas qui consiste à ajouter uniformément une même anomalie à la série de données observées (ici 1961/1990), pour chacune des 35 stations. Les températures T_{min}, T_{moy} et T_{max} sont ainsi simplement affectées quotidiennement de la même anomalie (*e.g.* +1°C) et les pluies quotidiennes également (*e.g.* +20%).

- une méthode modifiant la distribution des événements pluvieux dans l'hivernage¹⁸: on ajoute (ou enlève) aléatoirement des événements pluvieux afin d'obtenir le cumul désiré. Cette seconde méthode a été testée car on a vu dans le chapitre 2 que les baisses de pluviométrie passées en Afrique de l'Ouest étaient dues à une diminution du nombre d'événements pluvieux plutôt qu'à une baisse de leur intensité.

- une méthode qui amplifie la variabilité interannuelle des pluies. Sur la période 1961/1990, au lieu d'ajouter la même anomalie (*e.g.* 20%) à toutes les années, on ajoute 10% aux 10 années les plus sèches, 30% aux 10 années les plus humides, et 20% aux autres, de manière à avoir 20% de changement en moyenne sur les 30 ans.

- une méthode qui amplifie la variabilité interannuelle des températures: identique à la méthode précédente mais avec les températures.

- Concernant les autres variables climatiques nécessaire au calcul des rendements

Pour toutes ces méthodes, et pour tous les scénarii, on garde les valeurs des autres variables (comme la durée d'insolation) identiques aux données observées (1961/1990). Cela peut introduire un biais puisque, par exemple, un changement dans les précipitations peut être lié à une couverture nuageuse différente et donc à une variation de l'apport radiatif. Pour minimiser l'impact de ces variables qu'on garde inchangées dans les scénarii, nous employons pour les calculs de bilan hydrique de SARRA-H (et donc pour les calculs de rendements) l'ET_o calculée selon la formule de Hargreaves, recommandée par la FAO lorsque peu de variables sont disponibles (Allen *et al.* (1998)) et qui n'emploie que des données de températures (T_{min}, T_{max} et T_{moy}) et les coordonnées de la station, alors que la formule classiquement employée dans SARRA-H (Penman-Monteith) utilise en

¹⁸ terme désignant, dans les pays tropicaux, la période des pluies

plus la radiation, le vent et l'humidité relative. Si l'évaluation de l'ETo avec la formule d'Hargreaves est moins précise qu'avec la formule de Penman-Monteith, les résultats en termes de rendement sont tout de même assez similaires. On a ainsi comparé pour une variété de mil, sur les 35 stations et le climat actuel (1961/1990), les ETo Penman-Monteith et Hargreaves et les rendements associés.

Les deux ETo sont relativement similaires (Figure 2) avec seulement 7 stations sur 35 où la différence moyenne sur 30 ans excède 10% (et aucune où la différence excède 25%) et des moyennes spatiales très proches (Hargreaves 0.8% plus faible). Les résultats sont encore plus proches pour les rendements où seules quatre stations ont une différence de plus de 10%. En moyenne spatiale, l'écart relatif est de 1.2%. Comme on raisonne dans le chapitre 3 fréquemment en moyenne sur les 35 stations, utiliser l'ETo Hargreaves est dans notre cas une approximation acceptable. On peut de plus supposer que comme on présente toujours les résultats en différence relative entre deux horizons de temps, les biais créés par l'utilisation de l'ETo Hargreaves s'annulent plus ou moins.

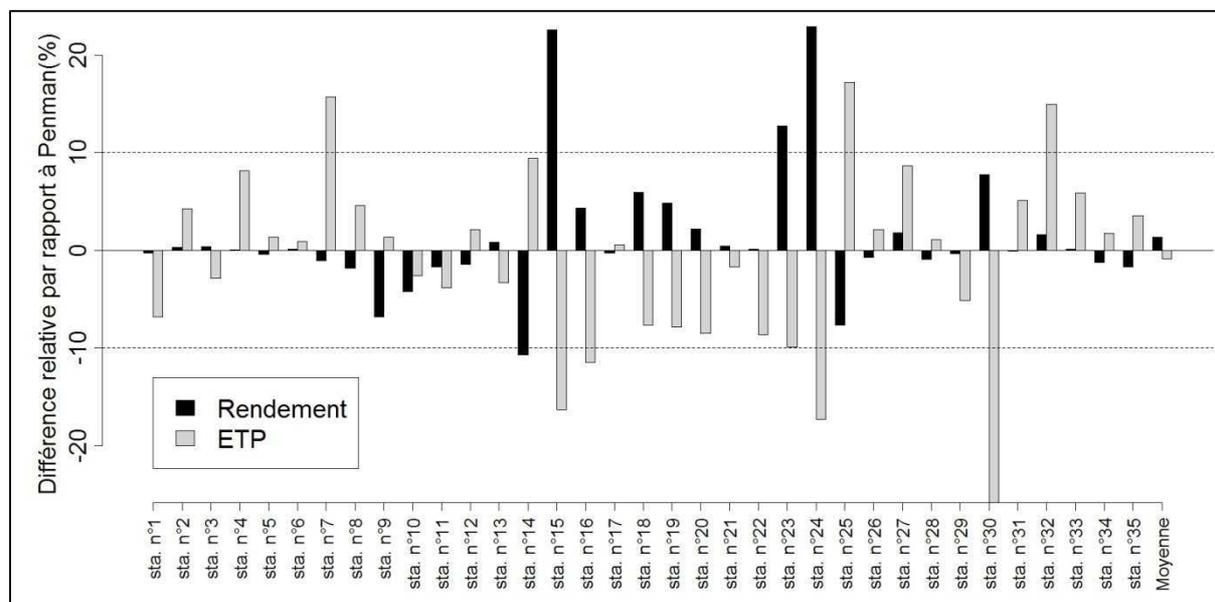


Figure 30: différence relative pour la valeur de l'ETo et du rendement calculé entre l'ETo Hargreaves et Penman-Monteith, pour les 35 stations et en moyenne (colonnes de droite)

Enfin, il faut souligner que, bien qu'on ait fait varier les deux variables séparément, on a vu au chapitre précédent que la pluie et les températures de surface étaient liées. Par exemple, Douville (2006) démontre sur le Sahel que des précipitations entraînent une baisse des températures de surface via l'évaporation de l'eau et la réduction des flux radiatifs due aux nuages. Il est donc possible que certains scénarii ne soient pas tout à fait réalistes. S'il faut être conscient de cette limite, ce type d'approche par scénarii reste intéressante car elle permet de réaliser des analyses de sensibilité des rendements aux changements de température et de précipitation. De plus, on verra par la suite qu'à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, les projections des GCMs couvrent une grande majorité des scénarii définis ce qui tend à montrer qu'en moyenne ils ne sont pas physiquement incohérents.

2.2.2 Comparaison de l'impact de ces différents scénarii sur les résultats

- Rendement moyen

Nous comparons dans cette section les résultats issus des différentes méthodes d'élaboration des scénarii. La Figure 31 présente ainsi pour plusieurs scénarii les différences d'évolution de rendement entre la méthode des deltas, que nous considérons comme la méthode de base, et les trois autres. Les résultats montrent que les différences sont minimales sauf pour le scénario +0°/+20% avec la méthode des changements de pluies intra-saisonnières.

Premièrement, pour les deux méthodes amplifiant la variabilité interannuelle, les résultats sont très proches en moyenne sur les 30 ans car les rendements plus bas des années à +10% de pluie sont globalement compensés par les rendements plus haut de celles à +30%. Deuxièmement, pour la modification intra-saisonnière de la distribution des pluies avec le scénario +20%, l'écart avec la méthode des deltas est plus important à cause d'un artefact de la méthode employée. En effet, il est nécessaire, lorsqu'on considère des anomalies de pluie positives, de rajouter des événements pluvieux durant la saison des pluies. Etant donné qu'on autorise un ajout d'événement jusqu'à début novembre, ce bornage est trop large pour certaines stations où cela crée des situations improbables en fin de saison (arrêt des pluies pendant 20/30 jours puis reprise: la pluie ajoutée n'a donc pas d'intérêt agronomique). La différence constatée sur la Figure 31 reflète donc plus ce problème de bornage que l'impact du changement de la distribution des pluies. Le scénario -20%, qui n'est pas affecté par ce problème, montre quant à lui que les deux méthodes donnent des résultats similaires. Notons qu'on aurait pu s'attendre à un impact plus négatif sur le rendement, car enlever des événements pluvieux peut créer des sécheresses à des moments critiques. En pratique, il arrive en fait peu souvent que l'événement pluvieux supprimé le soit durant une phase critique. L'effet n'est donc pas plus important avec cette méthode.

- Variabilité interannuelle (étude grâce au CV)

Nous nous intéressons dans un deuxième temps à l'impact des ces différentes méthodes sur la variabilité interannuelle. La Figure 32 montre que les différences sont cette fois plus importantes, surtout pour les méthodes concernant la pluie (en bleu et vert sur le graphique). De plus, et assez logiquement, la variabilité est toujours plus forte avec les méthodes influant directement sur la variabilité interannuelle des pluies qu'avec la méthode des deltas. Pour la méthode changeant la distribution interannuelle des pluies (en bleu), on a vu que les résultats pour le scénario 0°C/+20% n'étaient pas directement utilisables en l'état car ils reflètent plus un artefact de la méthode. En revanche, pour le scénario 0°C/-20% on remarque que cette méthode tend plus à limiter l'augmentation du CV que la méthode des deltas.

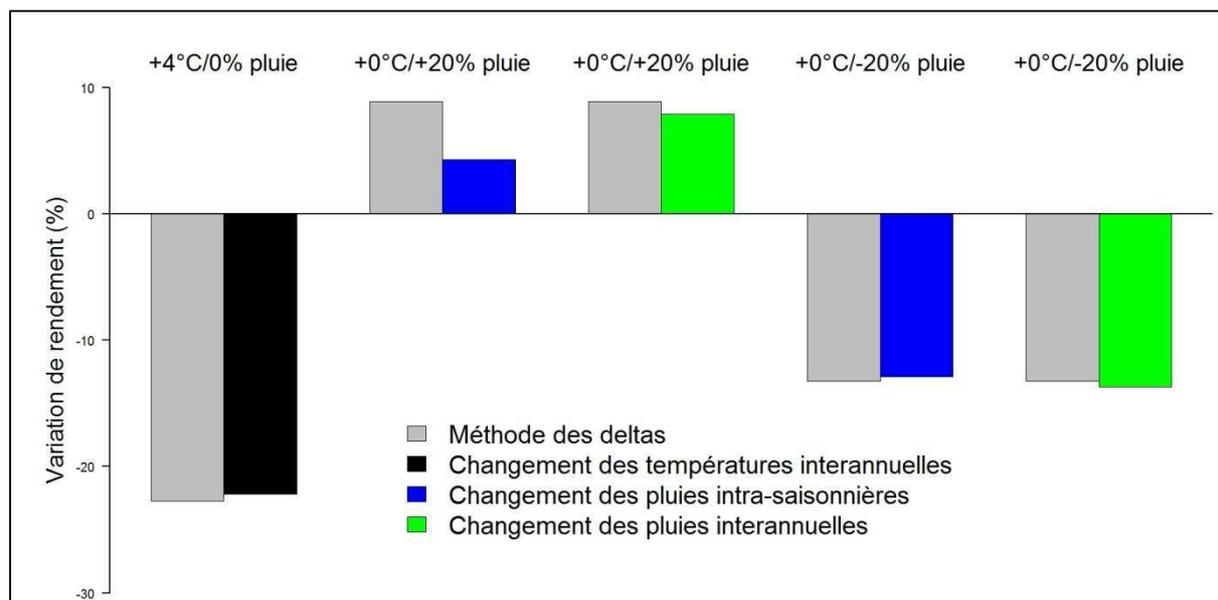


Figure 31: comparaison de la variation de rendement calculée avec différentes méthodes pour élaborer les scénarii climatiques

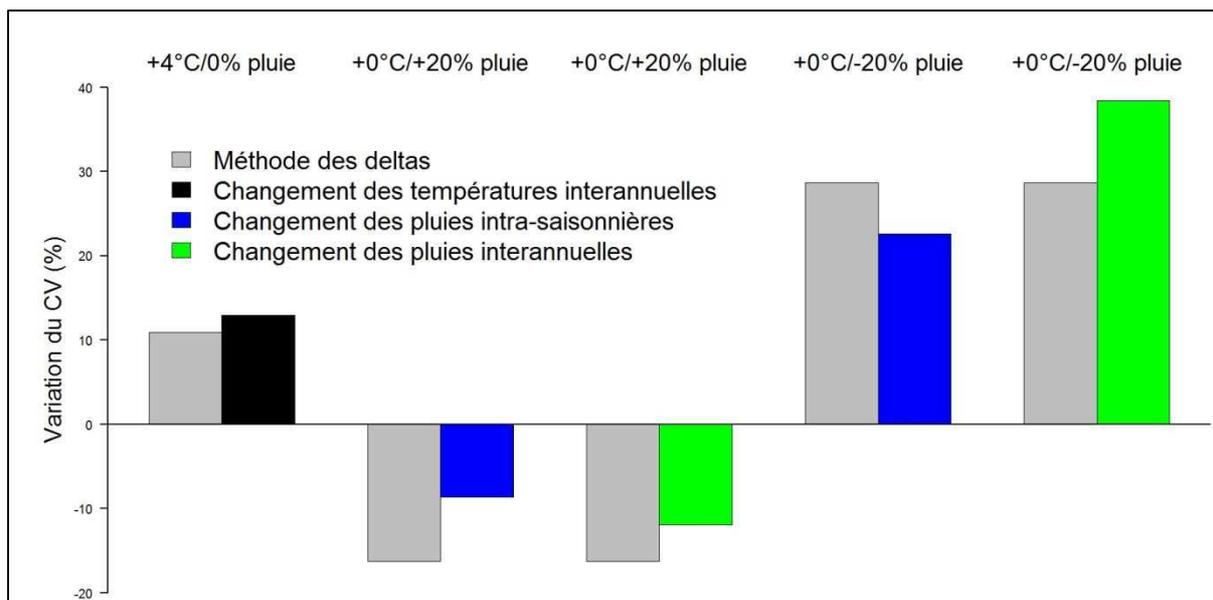


Figure 32: comparaison de la variation du coefficient de variation (CV) calculée avec différentes méthodes pour élaborer les scénarii climatiques

En conclusion, nous gardons pour le reste de l'étude la méthode des deltas qui est la plus simple et qui donne des résultats concernant les rendements moyens très proches des autres méthodes testées. Néanmoins, lorsqu'on s'intéresse au Coefficient de Variation les différences sont plus importantes, mais la méthode des deltas reste, par exemple pour le scénario +0°C/-20%, celle qui donne un résultat intermédiaire.

On peut ainsi utiliser ces scénarii climatiques fondés sur la méthode des deltas pour calculer sur les 35 stations les rendements des cultures choisies puis en déduire l'évolution relative de rendement par rapport au climat actuel (1961/1990). Cela fait au total 220 500 simulations (30 années *35 stations *35 scénarii *6 variétés).

3. Résultats et discussion

3.1 Sur la présentation des résultats

Nous sommes amenés dans la section 3 à étudier certaines variables moyennées sur la zone d'étude. Pour toutes les moyennes spatiales, il faut préciser que nous choisissons la moyenne "brute" sur les 35 stations, ce qui peut donner un poids plus important à la côte atlantique, le réseau de stations y étant plus dense. Nous avons essayé, pour pallier ce problème, de pondérer cette moyenne en superposant une grille de 2.5 degrés de résolution sur le réseau de stations et en faisant l'hypothèse que les n stations comprises dans la même maille étaient équivalentes à une station moyenne avec un rendement associé où le poids de chaque station est équivalent (1/n). Cela fait au total 17 "équivalent-stations" sur la zone d'étude. Cependant, nous avons préféré ne pas représenter ces résultats par la suite car, si les résultats diffèrent légèrement en termes de rendement brut (par exemple pour le scénario de référence 1365kg/ha vs 1418 kg/ha), ils sont très peu différents en terme de variation (Figure 33). De plus, il est plus facile de visualiser pratiquement ce que l'on représente avec la moyenne "classique" plutôt qu'avec le concept de station fictive équivalente. Ainsi, dans le reste l'étude, lorsqu'on donnera des résultats pour "l'Afrique de l'Ouest", il s'agira de la moyenne sur les 35 stations.

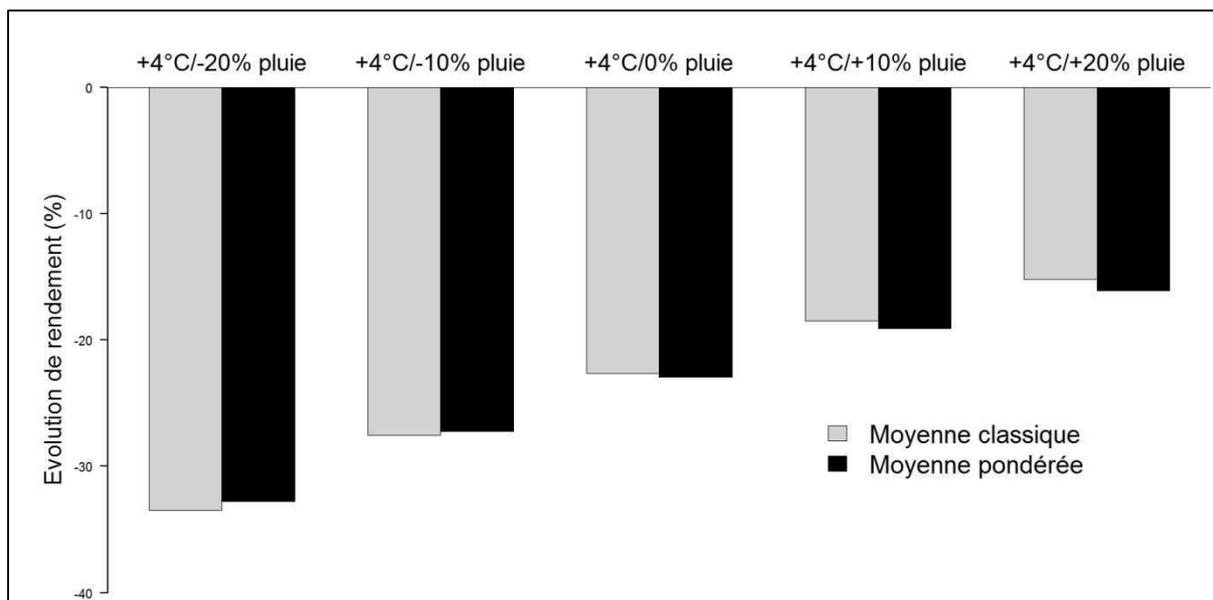


Figure 33: impact du type de moyenne spatiale utilisé sur la variation relative de rendement (%) calculé par SARRA-H, pour cinq scénarii. Les valeurs présentées ici sont pour une moyenne sur les six variétés, sur les 30 années.

3.2 Rendements observés vs rendements simulés par SARRA-H

Avant de s'intéresser aux projections de rendements, il est nécessaire de regarder dans quelle mesure SARRA-H (voir la description au chapitre 1) permet de représenter fidèlement l'impact du climat sur les rendements. Pour cela, on compare les données simulées aux données observées de rendement FAO (mil et sorgho) sur la période 1961/1990, premièrement en moyenne sur les pays considérés en Afrique de l'Ouest puis pays par pays.

3.2.1 A l'échelle de la sous région

- Rendement brut

En considérant les valeurs absolues de rendements, on remarque en premier lieu que SARRA-H surestime les rendements de façon importante (Figure 34). Ceci est compréhensible, puisque le modèle ne tient pas compte de facteurs biotiques pouvant baisser les rendements, comme les attaques de ravageurs et les parasites, ou encore les pertes au moment de la récolte. Ce point n'est pas gênant dans cette étude puisque nous étudions uniquement les évolutions relatives de rendement.

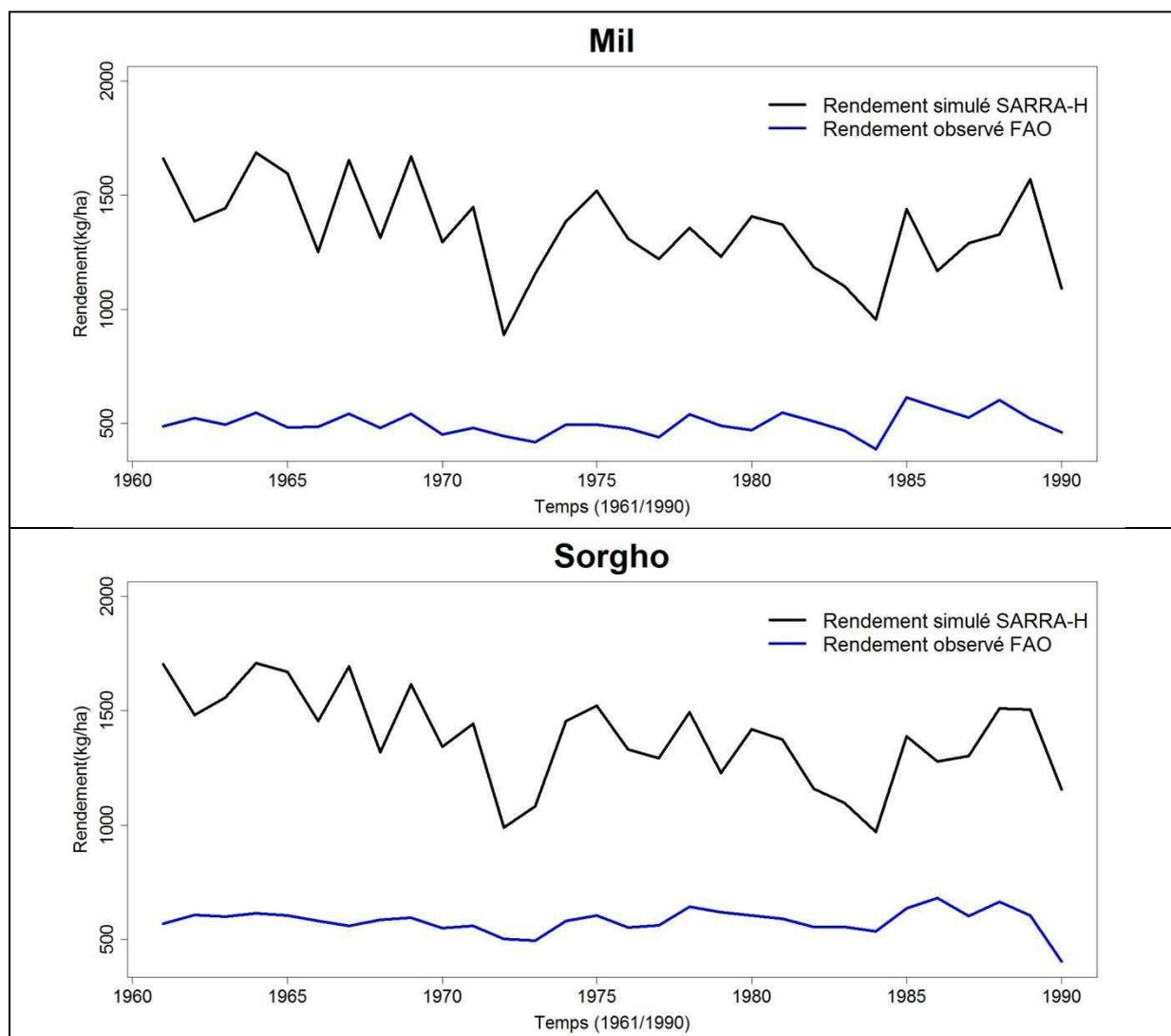


Figure 34: comparaison des rendements moyens bruts observés et simulés (SARRA-H) pour le mil (figure du haut) et le sorgho (bas). Pour les rendements SARRA-H, il s'agit d'une moyenne sur les 35 stations et 3 cultivars et pour les données FAO une moyenne sur les pays 9 considérés (moyenne pondérée par la surface cultivée)

- Corrélation

Nous étudions par la suite les corrélations entre les séries de rendements observés et simulés. On s'intéresse dans un premier temps aux séries brutes de rendements: les coefficients de corrélation pour le mil et le sorgho sont alors tous deux de 0.49 sur la période 1961/1990. Cependant, il est probable que les rendements réels soient influencés par des facteurs non climatiques, qui ne sont pas représentés dans SARRA-H.

Ainsi, afin de ne garder que les variations dues au climat, on enlève de ces données FAO observées une tendance linéaire représentant le progrès technique. Cependant, cette opération pouvant également soustraire une hypothétique tendance climatique, on enlève également une tendance linéaire aux données simulées (et calculée sur les données simulées), afin de comparer des situations identiques. La Figure 35 montre alors que la corrélation augmente pour les deux séries ($R=0.64$ pour le mil et 0.57 pour le sorgho sur 1961/1990); de plus, le score du sorgho augmente largement ($R=0.71$) en enlevant l'année 1990 qui paraît aberrante. Notons que ces coefficients de corrélation sont calculés en prenant comme données simulées la moyenne des trois cultivars, pour chacune des deux céréales: c'est la moyenne multi-variétés qui donne la meilleure corrélation avec les données FAO.

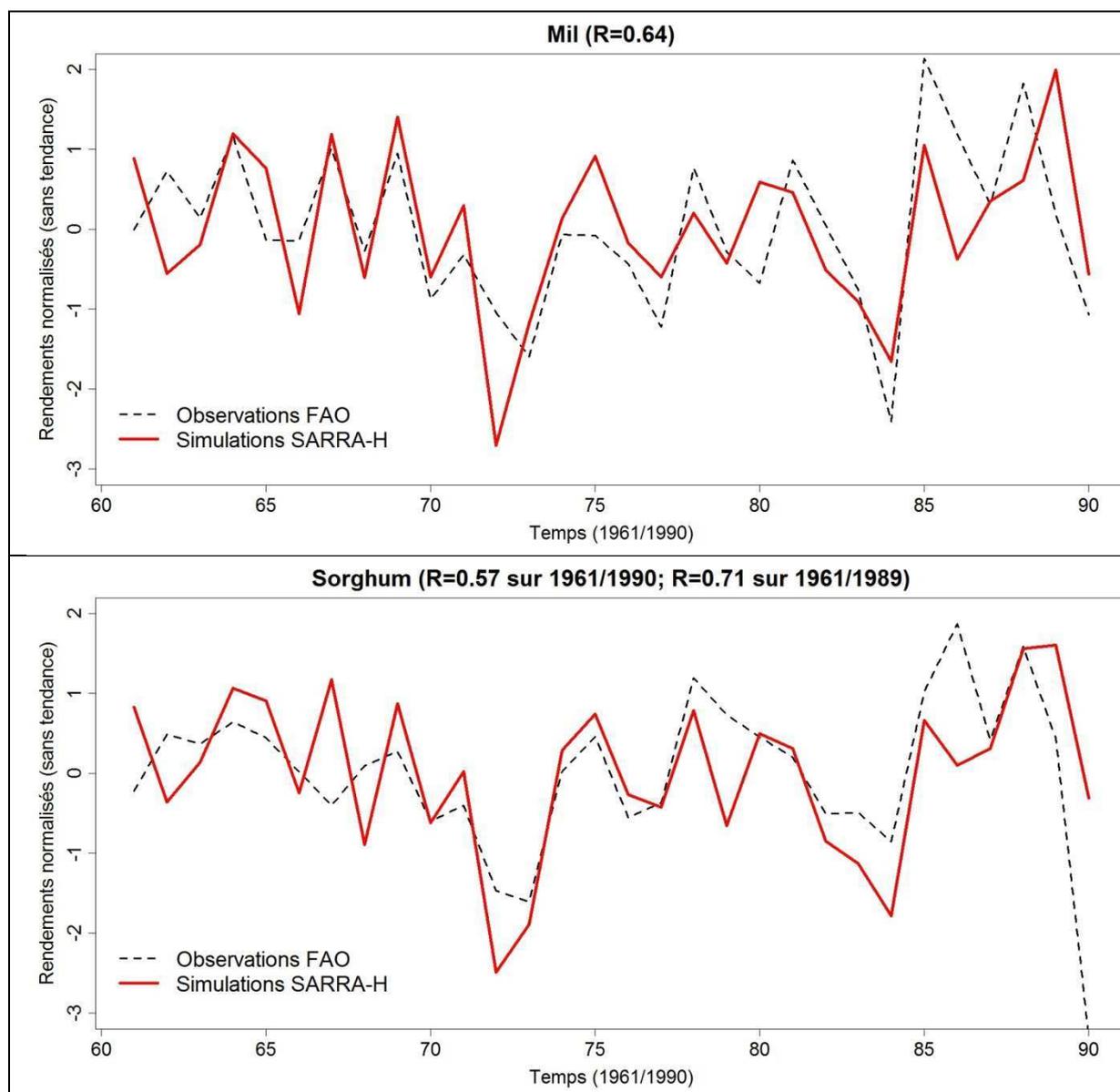


Figure 35: comparaison des rendements observés (FAO) et simulés (SARRA-H) pour le mil (figure du haut) et le sorgho (bas). Pour les observations et les simulations, on a enlevé une tendance linéaire sur la période et on a standardisé les valeurs de rendement ainsi trouvées. Pour les rendements SARRA-H, il s'agit d'une moyenne sur les 35 stations et 3 cultivars. Pour les rendements FAO, on a fait la moyenne sur les 9 pays concernés (moyenne pondérée par la superficie). R est le coefficient de corrélation de Pearson.

3.2.2 Pays par pays

Pour plus de détails, on étudie dans cette section la corrélation entre les rendements observés et les rendements simulés pour les principaux pays de l'étude: Burkina Faso, Mali, Sénégal et Niger. Le Tableau 10 présente ainsi la valeur des coefficients de corrélation par pays, pour les données brutes et pour les données auxquelles on a enlevé une tendance linéaire. Ce sont globalement le Niger et le Sénégal qui ont le lien le plus fort entre données observées et simulées. Le faible score du Burkina avec les données brutes et sa nette amélioration lorsqu'on enlève une tendance linéaire peut s'expliquer par la tendance croissante des rendements pour ce pays. Cette tendance semble due à l'amélioration technique avec par exemple une évolution de la consommation moyenne d'engrais passant de 2 à 7 kg/ha entre 1980 et 1990 (Blein *et al.* (2008)) alors que celle-ci stagne pour le Niger et diminue pour le Sénégal (de 8 à 5 kg/ha). De plus les essais

menés pour calibrer les variétés dans SARRA-H ont été réalisés au Mali, Sénégal et Niger: on peut faire l'hypothèse que cela a une influence sur les résultats.

Finalement, si le modèle SARRA-H représente assez inégalement selon les pays l'influence du climat sur les rendements des céréales, surtout à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest: on peut donc s'intéresser à l'évolution des rendements futurs en Afrique de l'Ouest en utilisant ce modèle.

Type de données	Culture	Burkina	Mali	Niger	Sénégal
Brutes	Mil	0.13	0.23	0.58	0.45
	Sorgho	0.02	0.15	0.66	0.27
Sans tendance linéaire	Mil	0.22	0.41	0.45	0.72
	Sorgho	0.34	0.48	0.42	0.50

Tableau 10: coefficients de corrélation de Pearson, par pays et par culture, entre les données observées (FAO) et les données simulées par SARRA-H, sur la période 1961/1990. On présente une corrélation avec les données brutes (pour les deux séries) et une corrélation pour laquelle on a enlevé à chacune des séries (observée et simulée) une tendance linéaire représentant le progrès technique. Pour les données simulées par SARRA-H les rendements du mil et du sorgho sont la moyenne des 3 cultivars.

3.3 Evolution des rendements futurs en Afrique de l'Ouest

3.3.1 Evolution du rendement moyen

- Selon les scénarii climatiques définis

On peut calculer pour chacun des scénarii l'évolution du rendement moyen des six variétés considérées (relativement à 1961/1990), afin d'avoir une vue globale de l'impact du climat sur les céréales sèches en Afrique de l'Ouest (Figure 36). Si toutes les variétés que nous avons sélectionnées ne sont pas forcément utilisées dans chacune des 35 localités, nous conservons cependant les six cultures car (i) nous ne disposons pas pour chaque station des variétés réellement utilisées *in situ* et (ii) avec des scénarii climatiques variés, les pratiques peuvent changer.

Tout d'abord, il faut noter qu'une augmentation de température d'un degré tout comme une baisse de la pluviométrie de -10% entraînent toujours une baisse des rendements, mais de façon non-linéaire. Ainsi, la différence d'évolution des rendements entre le scénario +0°C/+0% et +1°C/+0% est de 6.2% mais de 4.1% entre +5°C/+0% et +6°C/+0% ; de même elle est de -7.5% entre +0°C/-20% et +0°C/-10% mais de -4.2% entre +0°C/+10% et +0°C/+20%. De ce fait, il est clair que la plupart des scénarii considérés entraînent une baisse des rendements (en rouge sur les graphiques). Notons que les différences de rendement moyen calculées sont toutes significatives à 5% (z-test¹⁹, similaire au t-test de Student mais ne faisant pas d'hypothèse sur la normalité de la distribution lorsque les échantillons sont grands) sauf pour le scénario +1°C/+10% (case barrée sur la Figure 36). De plus, seules les variations de rendement pour les scénarii +0°C/+10%, +0°C/+20% et +1°C/+20% sont positives (avec une évolution maximum de 9%). Cela signifie qu'en Afrique de l'Ouest, au-delà de +1°C, même d'hypothétiques fortes anomalies positives de pluie (+20%) ne peuvent compenser les pertes engendrées par le réchauffement. La pire situation se trouve logiquement pour le scénario combinant une forte augmentation de température et une baisse de pluie (-41% de rendement moyen). Conformément aux résultats du chapitre précédent, la tendance négative est due majoritairement à l'augmentation de température que l'évolution de la pluie peut aggraver ou modérer. Cet effet négatif de la température sur les rendements peut s'expliquer par plusieurs causes. Une température plus élevée entraîne en effet:

¹⁹ <http://finzi.psych.upenn.edu/R/library/BSDA/html/z.test.html>

- une demande climatique (évapotranspiration potentielle) accrue et donc un stress hydrique supplémentaire (+8% en moyenne pour le scénario +4°C)

- une augmentation de la respiration de maintenance par unité de biomasse (+30% en moyenne pour le scénario +4°C). La plante doit utiliser plus d'énergie pour maintenir sa biomasse déjà créée et a donc, pour même rayonnement, moins d'énergie pour créer de la biomasse nouvelle.

- une réduction de la longueur de la cycle (-10 jours en moyenne pour le scénario +4°C). En effet, pour les cultures et les gammes de températures étudiée, une augmentation de température entraîne une augmentation de la vitesse de croissance des plantes. Chaque phase de croissance est ainsi caractérisée par un temps thermique constant, exprimé en degré-jour (voir page 31): plus il fait chaud (dans certaines limites), plus la plante atteint rapidement le nombre de degré-jours requis.

- Selon les projections des GCMs de l'AR4

Afin de visualiser, sur les graphiques, où les scénarii futurs les plus probables se situent, nous avons ajouté les projections de température et précipitation prévues par les GCMs utilisés dans l'AR4 (voir chapitre 1), pour deux horizons temporels (moyenne sur 2031/2050 et 2071/2090, Figure 36, haut) et trois scénarii d'émission (A1B, A2 et B1, Figure 36, bas). Il s'agit de l'anomalie moyenne sur l'Afrique de l'Ouest (19°O à 17°E en longitude et 2.5°N à 25°N en latitude) durant la saison des pluies (mai à septembre). Nous avons également placé les décennies du XXe siècle (par exemple 1911/1920 est symbolisé par "1910") en utilisant leurs anomalies de pluie et températures (données CRU, moyenne sur la même fenêtre spatiale que les GCMs).

On remarque tout d'abord clairement que les hypothétiques climats futurs simulés par les GCMs engendrent tous des baisses de rendement, même pour des scénarii modérés à l'horizon 2040. D'autre part, il est flagrant que les rendements futurs en Afrique de l'Ouest pourraient connaître des évolutions bien plus négatives que lors du XXe siècle. Cela est notamment dû au réchauffement relativement limité (au regard du futur) lors du siècle passé: en effet, comme on l'a vu dans le chapitre 2, l'augmentation de température au XXe siècle en Afrique de l'Ouest est de l'ordre de +1°C, ce qui est largement inférieur à la plupart des projections.

Pour mieux visualiser les évolutions de rendements pour les trois horizons de temps (XXe siècle, 2040s et 2080s), on a par la suite calculé pour chacun la probabilité d'occurrence de chaque classe de rendement (Figure 37). Pratiquement, on a dénombré pour chaque horizon temporel le nombre de GCMs prévoyant telle ou telle classe de rendement. Cela montre par exemple qu'à l'horizon 2080, plus de 50% des GCMs (pour les trois scénarii SRES considérés) prévoient une baisse de rendement entre -10% et -20%, alors que cette classe n'apparaît pas au cours du XXe siècle. De plus, la classe[-41%:-30%] qui n'apparaît ni au XXe siècle ni sur la période 2031/2050 aurait 8% de chance d'avoir lieu à l'horizon 2080.

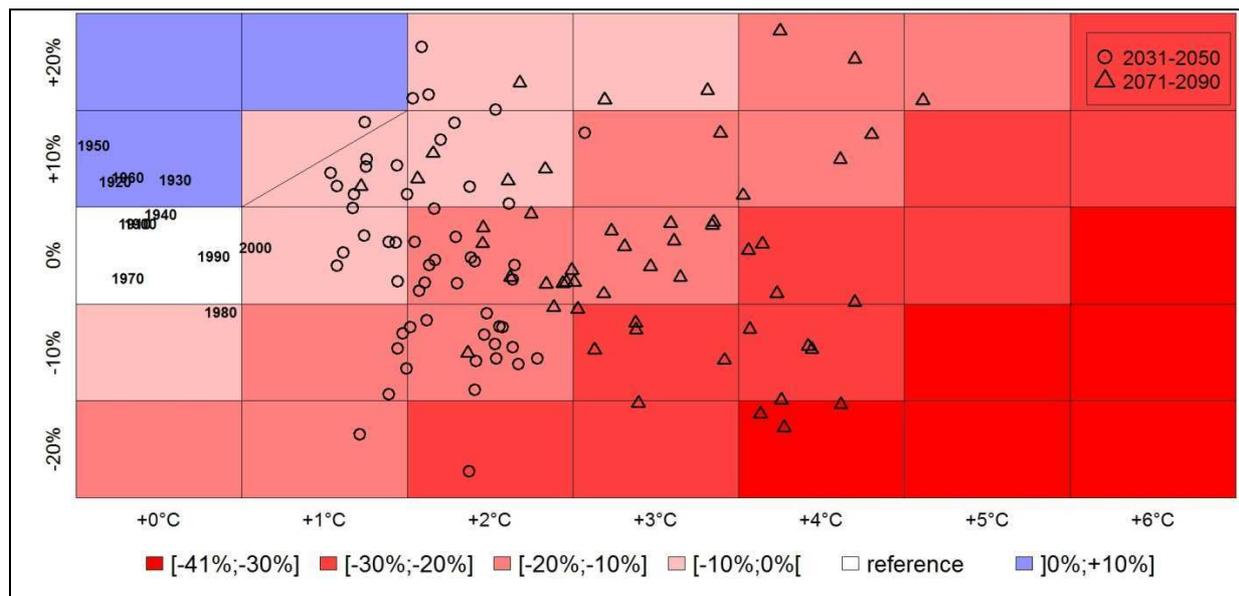


Figure 36: Changement de rendement moyen par rapport à la période 1961-1990 en fonction des anomalies de températures (abscisses) et de précipitations (ordonnées). Les anomalies observées dans le passé et projetées pour le futur sont exposées sur le graphique sur une base décennale pour les observations du CRU et pour deux horizons temporels futurs 2031-2050 et 2071-2090. Le rendement est moyenné sur les 6 variétés considérées et sur les 35 stations disponibles. Le graphique indique les horizons temporels des projections. Le GCM et l'horizon SRES employés pour chaque projection sont détaillés en annexe (page 180).

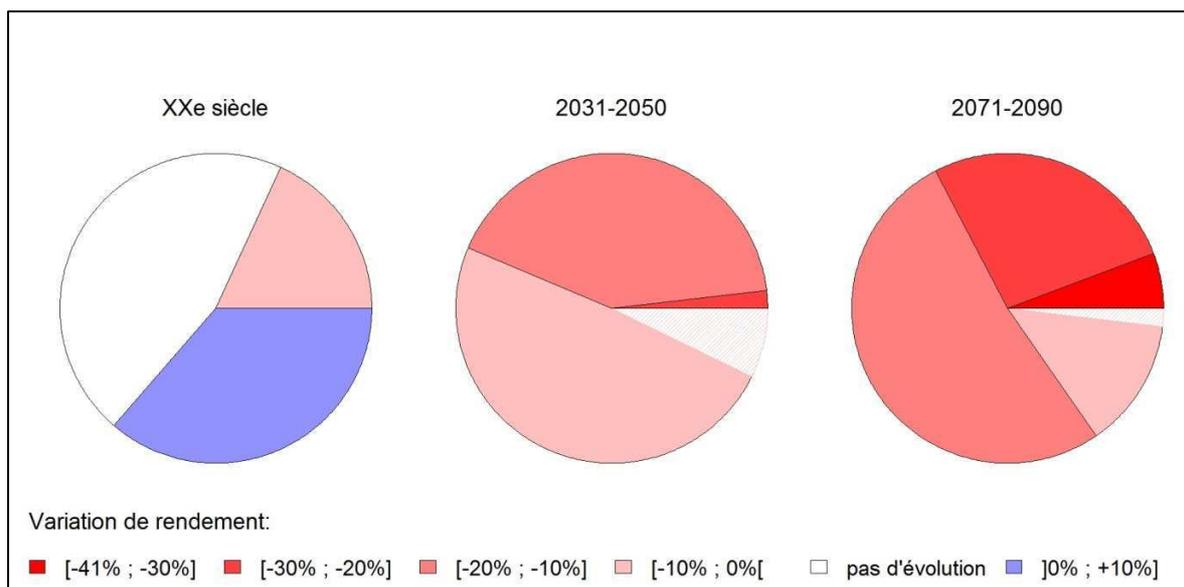


Figure 37: bilan de la part relative de chaque classe d'évolution de rendement pour: à gauche, le XXe siècle (les 10 points "CRU" de la figure précédente), au milieu : 2031/2050 (les points "2031/2050" de la figure précédente) et à droite: 2071/2090 (les points "2071/2090"), selon les projections de température et pluie des GCMs de l'AR4. Les classes de valeurs représentées par des hachures signifient que la tendance pour ce scénario n'est pas statistiquement différente à 5%.

- Selon les sorties de l'AR5

Comme on l'a vu dans le chapitre 2, les premières simulations des GCMs utilisées pour le futur 5^e rapport de l'IPCC sont désormais disponibles. Ainsi, nous réalisons avec ces simulations le même travail qu'avec les GCMs de l'AR4 afin de voir si les résultats concernant les futurs possibles sont différents. Il faut noter que les nouvelles simulations de l'AR5 sont réalisées avec des scénarii d'émission différents de l'AR4. Nous sélectionnons donc trois scénarii qui sont proches des SRES A1B, A2 et B1: les scénarii RCP 6.0, 8.5 et 4.5 (Moss *et al.* (2010)), dont nous représentons les anomalies de pluie et de température sur la Figure 38, pour les deux horizons temporels 2031/2050 et 2071/2090. Rappelons que ces modèles de l'AR5 prévoient globalement des évolutions de température similaire à l'AR4 et plus de pluie. En termes d'évolution de rendement, les résultats sont très proches entre l'AR4 et l'AR5 (Figure 39): on note seulement avec l'AR5 une occurrence légèrement moins forte des classes très négatives (*e.g.* [-41% ; -30%] à l'horizon 2080; [-30% ; -20%] à l'horizon 2040).

Ainsi, si les premières projections des GCMs de l'AR5 indiquent plutôt une tendance plus humide en Afrique de l'Ouest aux horizons 2040 et 2080, cette différence n'apparaît pas de façon flagrante dans les projections de rendement pour ces deux horizons temporels.

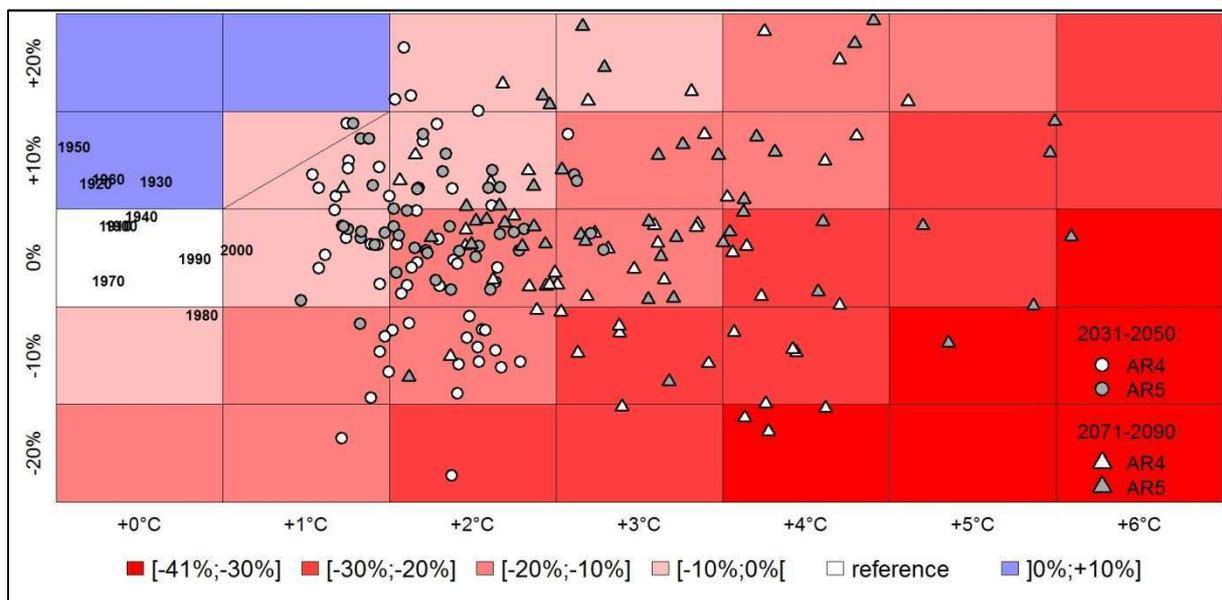


Figure 38: Changement de rendement moyen par rapport à la période 1961-1990 en fonction des anomalies de températures (abscisses) et de précipitations (ordonnées). Les anomalies observées dans le passé et projetées pour le futur sont exposées sur le graphique sur une base décennale pour les observations du CRU et pour deux horizons temporels futurs 2031-2050 et 2071-2090. Les points blancs représentent les résultats issus des GCMs de l'AR4 (3 scénarii d'émission) et les points gris les résultats de l'AR5 (3 autres scénarii d'émission). Le rendement est moyenné sur les 6 variétés considérées et sur les 35 stations disponibles. Les cases avec un trait transversal indiquent les différences non significatives à 5%.

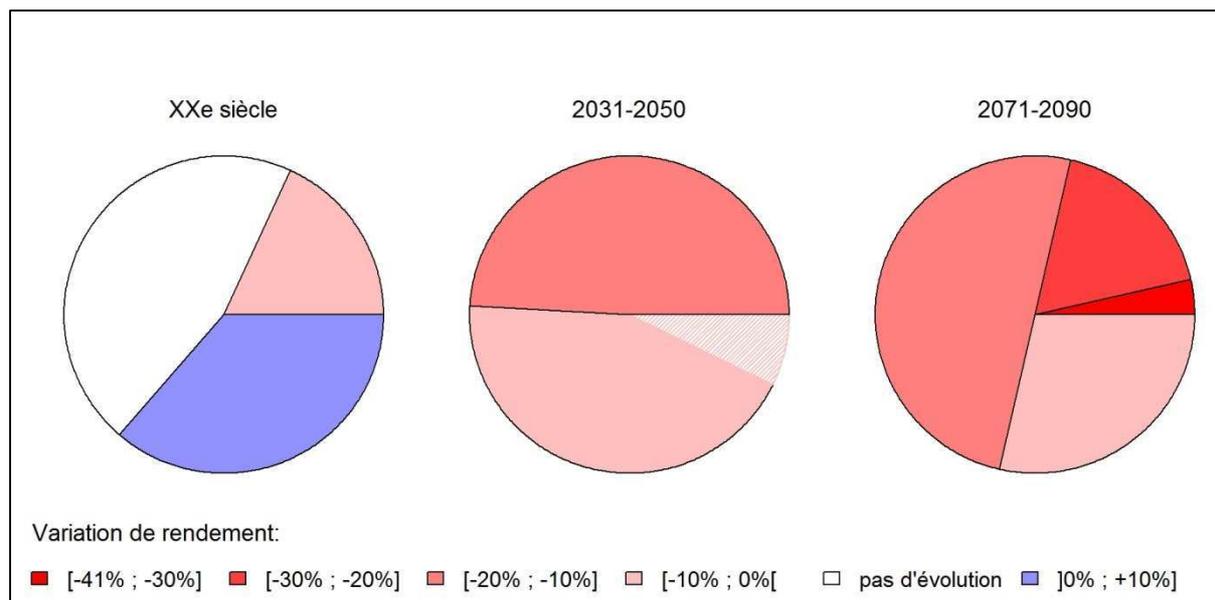


Figure 39: bilan de la part relative de chaque classe d'évolution de rendement pour: à gauche, le XXe siècle (les 10 points "CRU" de la figure précédente), au milieu: 2031/2050 (les points "2031/2050" gris de la figure précédente) et à droite: 2071/2090 (les points gris "2071/2090"), selon les projections de température et pluie des GCMs de l'AR5. Les classes de valeurs représentées par des hachures signifient que la tendance pour ce scénario n'est pas statistiquement différente à 5%.

3.3.2 Evolution du coefficient de variation du rendement

Si on s'est intéressé jusqu'à maintenant à l'évolution du rendement moyen, la variation interannuelle des rendements est également un paramètre important pour les agriculteurs ouest-africains. Comme on l'a vu, ceux-ci évitent en effet les pratiques culturales avec une grande variabilité (Gafsi *et al.* (2007)). Afin d'étudier la variabilité interannuelle des rendements, on calcule donc pour chaque scénario le Coefficient de Variation moyenné sur les 35 stations et les six variétés. On le compare alors au CV moyen pour la période actuelle, 1961/1990 (Figure 40), les cases barrées représentant les scénarii où le CV n'est pas significativement différent du contrôle, à 5%.

Deux observations émergent clairement de cette figure: premièrement, l'évolution du CV semble donner plus de scénarii positifs (bleus) que pour le rendement moyen. En effet, quelle que soit l'augmentation de température, le scénario pluviométrique +20% entrainerait toujours une baisse de la variabilité des rendements. Deuxièmement, les évolutions calculées ici sont beaucoup moins significatives que pour le rendement moyen. En effet, 17 scénarii sur 34 donnent lieu à des évolutions qui ne sont pas statistiquement significatives. Cela réduit alors de façon importante la part de scénarii montrant une diminution de la variabilité interannuelle: il n'en reste plus que 3 parmi 17 scénarii significatifs.

Ainsi, si le futur prévu par les GCMs peut paraître à première vue plutôt moins négatif pour le CV que pour les rendements moyens, comme le souligne la part importante de bleu (hachuré ou pas) dans les camemberts de la Figure 41, ces évolutions sont en fait rarement significatives (zones en couleurs pleines). Cela signifie que cette étude montre majoritairement une faible évolution de la variabilité interannuelle des rendements: les zones hachurées représentent ainsi sur la Figure 41 plus de la moitié du camembert. Dans une plus faible proportion, une augmentation de la variabilité est également possible pour les horizons 2040 et 2080 (rouge non hachuré) et, enfin, il demeure une très faible possibilité d'avoir une baisse du CV (bleu non hachuré). Il faut souligner que si l'évolution du CV futur est ici assez incertaine, c'est en partie dû à la méthode employée qui ne modifie pas la variabilité interannuelle des scénarii futurs. Si les scénarii significatifs sont majoritairement ceux avec une baisse des pluies, c'est parce que cela crée un effet de seuil. Toutes les cultures qui étaient avec le scénario de référence dans une situation limite vont avoir avec -10% ou -20% de pluie un rendement proche de zéro (*e.g.* semis raté, stress hydrique).

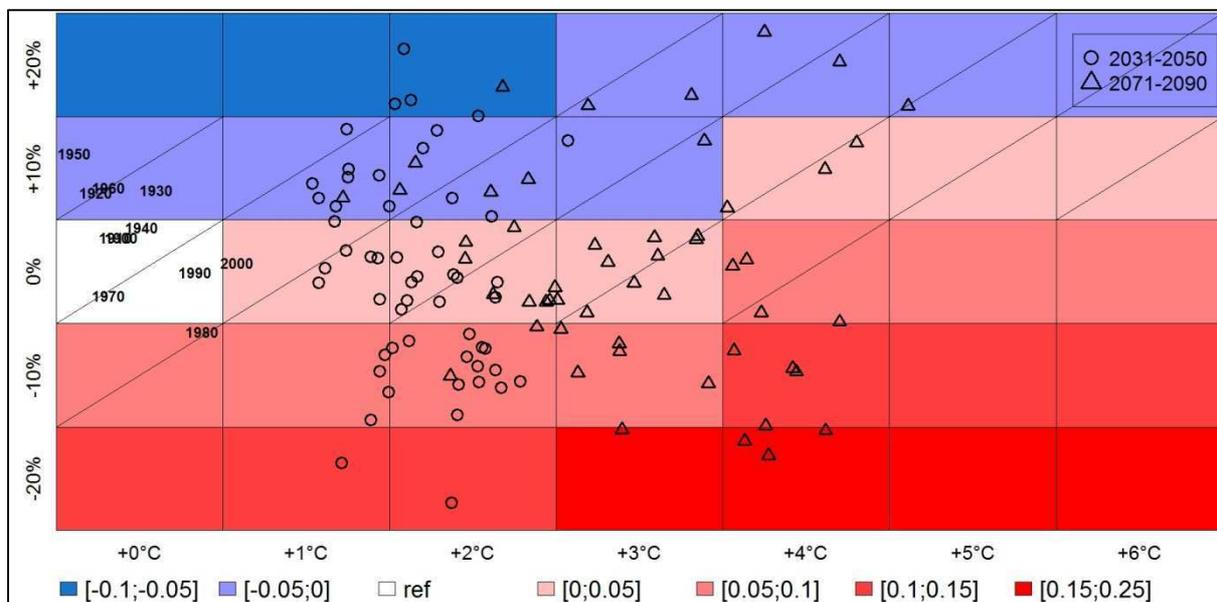


Figure 40: Changement de Coefficient de Variation interannuel moyen (sur les 35 stations et 6 variétés) par rapport à la période 1961-1990 en fonction des anomalies de températures (abscisses) et de précipitations (ordonnées). Les anomalies observées dans le passé et projetées pour le futur sont projetées sur le graphique sur une base décadaire pour les observations du CRU et pour deux horizons temporels futurs 2031-2050 et 2061-2090, pour les GCMs de l'AR4, avec 3 scénarii d'émission. Les cases avec un trait transversal indiquent les différences non significatives à 5%.

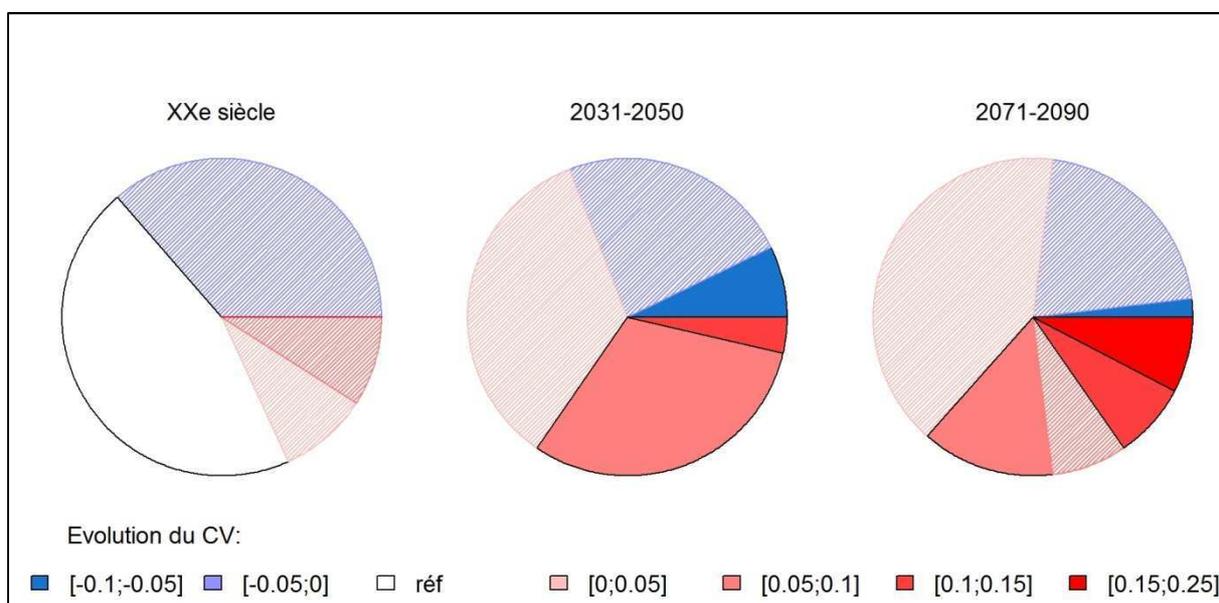


Figure 41: bilan de la part relative de chaque classe d'évolution du Coefficient de Variation (CV) pour: à gauche, le XXe siècle (les 10 points du CRU de la figure précédente), au milieu : 2031-2050 (les points "2031-2050 " de la figure précédente) et à droite: 2071-2090 (les points "2071-2090 "). Les classes de valeurs représentées par des hachures signifient que le CV pour ce scénario n'est pas statistiquement différent à 5%.

3.4 Différences spatiales

Nous avons souligné auparavant la nécessité de s'intéresser plus particulièrement à la variabilité spatiale. Pour cela, nous avons étudié dans un futur à +4°C (valeur notamment utilisée par Thornton *et al.* (2011)) la probabilité d'avoir une augmentation de rendement >10% et <-10%. Pour cela, on a considéré tous les scénarii de pluie, puisque l'évolution future de la pluie en Afrique de l'Ouest est hautement incertaine. Pour chacun des trois scénarii sélectionnés ici, nous avons calculé, pour chaque culture (6), station (35) et année (30) la différence relative de rendement avec le scénario de référence. On obtient donc 18 900 valeurs d'évolution des rendements qui représentent l'univers de probabilités utilisé pour calculer les résultats ci-dessous.

La Figure 42 montre clairement un gradient nord/sud dans les probabilités. Les stations situées en zone sahélienne (Nord de la zone) ont ainsi chaque année une probabilité plus importante d'avoir une évolution de rendement >10% que les stations du Sud. En d'autres termes, l'impact du changement climatique est clairement plus négatif dans le Sud de la sous-région, lorsqu'on considère comme équiprobable tous les scénarii de pluie. Cela peut paraître en apparence opposition avec les résultats du chapitre précédent (page 60) où on avait trouvé un impact plus faible en zone guinéenne, mais cela était alors dû aux projections des GCMs, plus optimistes sur la côte. Ici, les scénarii sont uniformes spatialement. Cette différence entre la zone sahélienne et guinéenne vient de leur sensibilité respective aux variations de pluie et de température. En effet, le Nord de la zone est soumis à un fort stress hydrique et est ainsi très sensible aux variations de pluie qui peuvent compenser l'augmentation de température, alors que le Sud, humide, est plus sensible à la température, puisque l'eau n'est pas un facteur limitant. Ainsi on a pour les stations du Nord une situation assez incertaine quant à l'évolution du rendement futur (globalement, 60% de chances d'avoir des pertes <-10% et 40% d'avoir des gains >10%) due aux différents scénarii de pluie.

On voit donc que les résultats précédents sur l'importance de la température dans l'évolution du rendement moyen futur dépendent finalement de la zone où l'on se situe: cela est vrai au Sud, mais pas en zone sahélienne où la pluie est le facteur prépondérant pour expliquer la variation des rendements moyens futurs et où une augmentation de pluie peut compenser la perte engendrée par une augmentation de température.

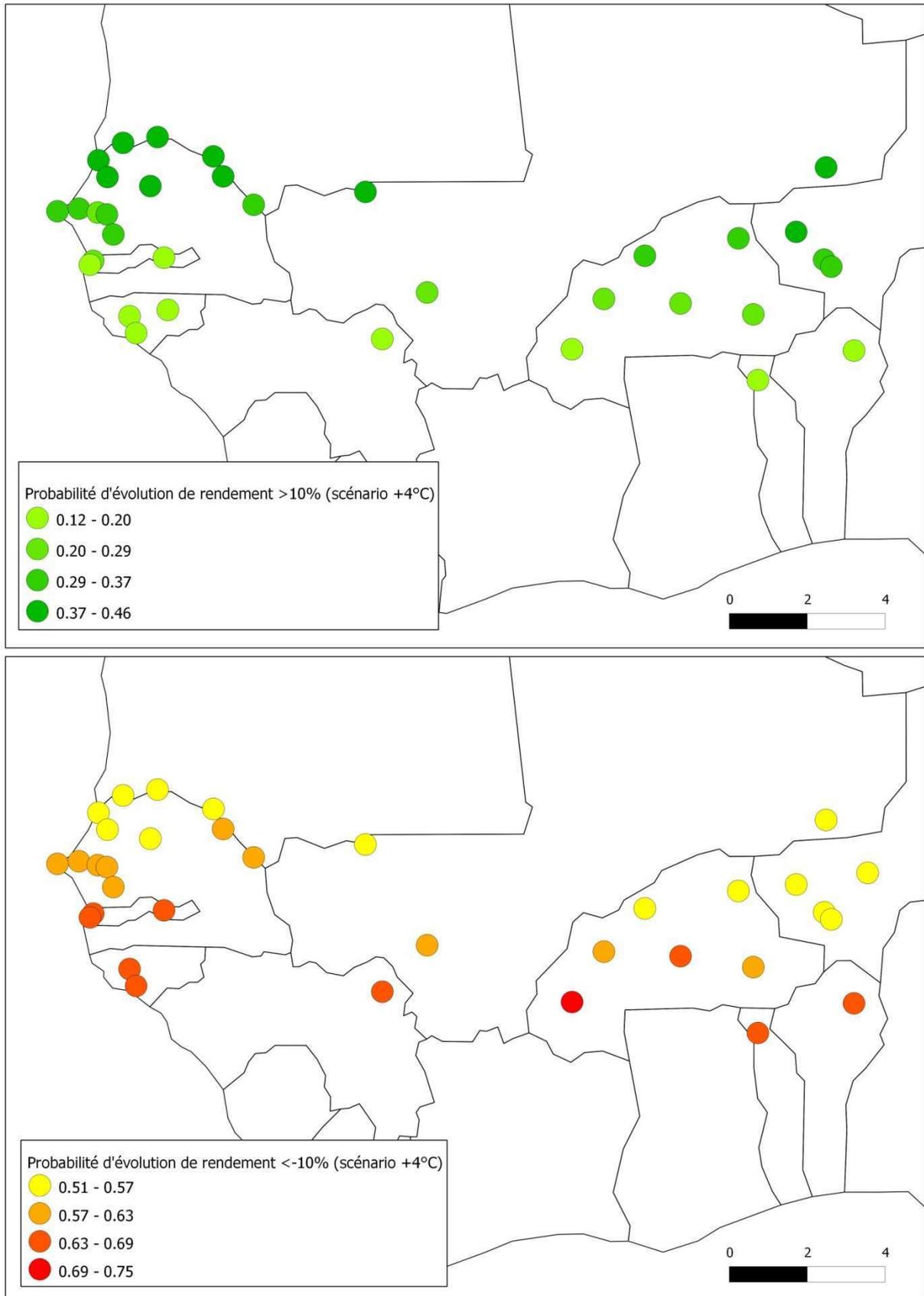


Figure 42: pour les scénarii +4°C/-20%, +4°C/-10%, +4°C/0%, +4°C/+10%, +4°C/+20%, probabilité d'avoir une évolution de rendement >+10% (en haut) et <-10% (en bas). L'univers des probabilité est calculé en effectuant pour chaque station, chaque année et pour chaque cultivar le rapport relatif entre le scénario donné et la période de référence (1961/1990).

3.5 Différences entre les variétés

Comme souligné précédemment, un autre point fondamental est l'analyse des différences entre les cultivars de la même variété (trois cultivars de mil et trois de sorghos). On détaille principalement dans cette section les différences d'évolution entre les cultivars à cycles courts faiblement photopériodiques (souna III et CSM 63) et les quatre autres (HKP, somno, timari, kénikéba). Notons que si HKP et timari ne sont pas aussi photopériodiques que kénikéba et somno, elles sont tout de mêmes plus proches de ces deux derniers cultivars que de souna III et CSM 63.

La Figure 43 et la Figure 44 montrent qu'il y a en effet des différences notables entre les six cultures étudiées. Si le scénario +1°C (Figure 43) présente des résultats variant seulement entre -4% et -9%, la dispersion est beaucoup plus forte pour les augmentations de température plus importantes. Par exemple, pour le scénario +4°C, le sorgho CSM connaît une évolution de -27% contre -15% pour le sorgho Timari, et le mil souna -28% contre -21% pour le mil somno. De plus, on remarque que ce sont toujours les variétés à cycle court et faiblement photopériodiques (mil souna et sorgho CSM 63) qui subissent l'impact le plus négatif. La Figure 44, qui se focalise sur le scénario +4°C, montre que cette différence entre les deux groupes de variétés persiste lorsqu'on fait évoluer la pluie: cependant une anomalie de pluie négative (positive) augmente (diminue) la différence. Ainsi, si pour le scénario sec (-20%), les variétés CSM/souna subissent une baisse de -40% contre -28% pour les quatre autres, pour le scénario humide, les évolutions sont de -18% et -12%, respectivement. Afin de renseigner l'incertitude autour de ces valeurs moyennes, nous avons réalisé une méthode de *bootstrap* simple qui consiste à effectuer mille tirages avec remise parmi les valeurs de rendements calculées, puis à calculer la variation relative de rendement pour chacun des tirages. Les bornes présentées sur la Figure 44 sont les 5^e et 95^e centiles des variations relatives de rendement ainsi trouvées. On voit dès lors que même en changeant l'échantillon les moyennes restent différentes.

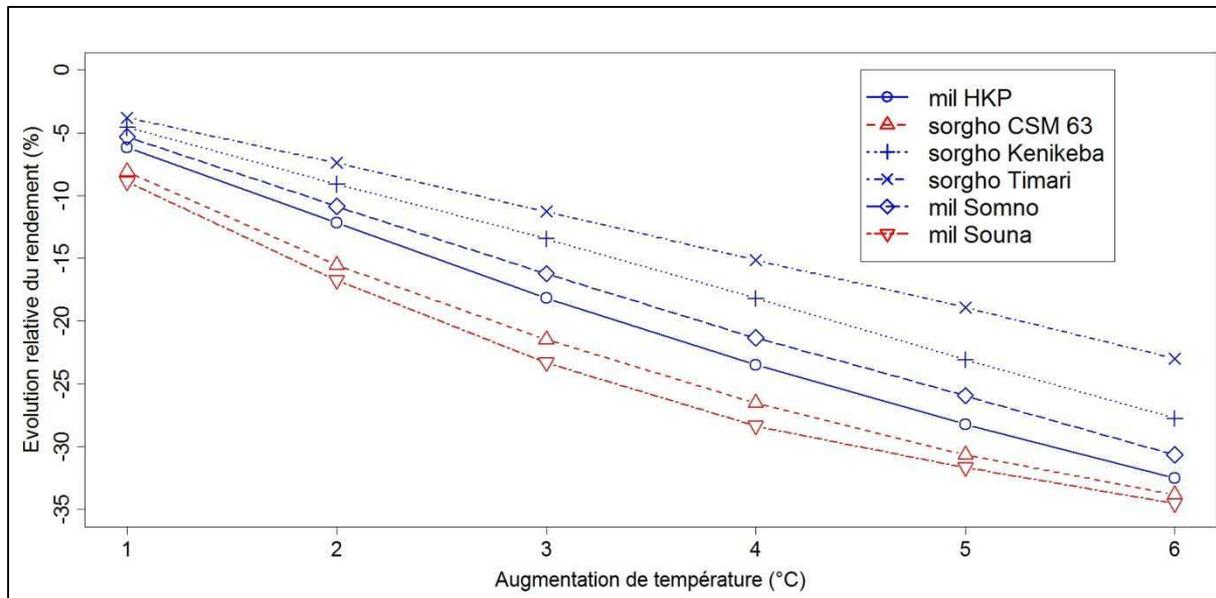


Figure 43: évolution relative du rendement pour chacune des 6 variétés et pour 6 scénarios (même anomalie de pluie (0%) et de +1°C à +6°C). Les valeurs présentées sont donc une moyenne sur les 35 stations et les 30 ans.

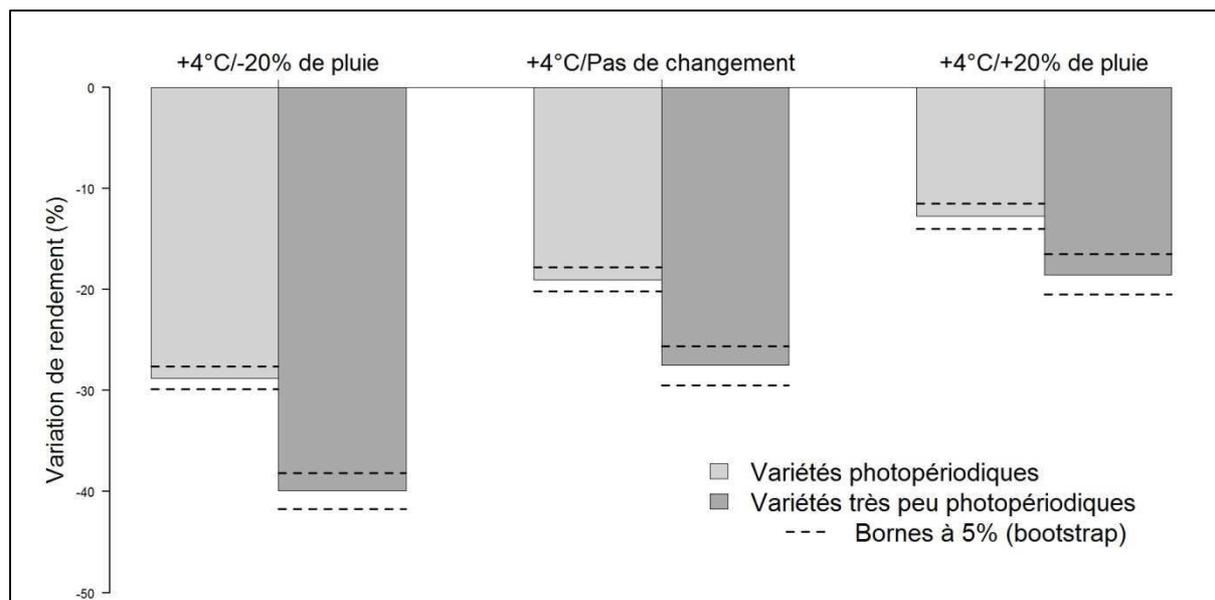


Figure 44: comparaison de la variation moyenne de rendement entre les variétés peu photopériodiques (CSM/Souna) et photopériodiques, pour trois scénarii différents: +4°C/-20% ; +4°C/0% ; +4°C/+20%. Les pointillés représentent les bornes calculées par une méthode de bootstrap

Il est donc nécessaire dans un deuxième temps de comprendre pourquoi de telles différences existent. On étudie pour cela les trois paramètres qu'on a identifiés comme responsables de la baisse des rendements: diminution de la longueur de cycle, augmentation de l'ETo et augmentation de la respiration de maintenance par unité de biomasse (Tableau 11). Pour ces trois paramètres, on note une différence entre Souna/CSM et les quatre autres cultures. L'ETo augmente légèrement plus pour CSM/Souna, tout comme la respiration de maintenance par unité de biomasse.; le cycle diminue quant à lui plus fortement (en relatif). Cependant, les différences d'ETo ne sont pas très importantes: il semble donc que ce soit majoritairement les deux derniers paramètres qui expliquent les différences entre les cultures. Si ces deux paramètres évoluent différemment selon les cultures, cela est dû finalement à la sensibilité des cultures à la photopériode: la Figure 45 montre ainsi une relation nette entre le photopériodisme et la variation relative de rendement. Les variétés photopériodiques ont en effet une partie de leur cycle (de 20 à 45 jours selon les cultivars) qui n'est pas influencée par la température mais par la photopériode. Cette phase photosensible agit donc comme un tampon à l'augmentation de température (Figure 46). Cela confère donc au photopériodisme un avantage supplémentaire par rapport aux points positifs déjà connus comme la minimisation des pertes en fin de saison (Traoré *et al.* (2007)). D'autre part, les cultivars CSM 63 et souna III sont plus sensibles au stress hydrique, ce qui explique l'accroissement de la différence avec les quatre autres cultures lorsqu'on considère une anomalie de pluie négative.

Variétés	Ecart-type longueur de cycle (j)	Variation ETo (%)	Variation respiration maint./biomasse tot (%)	Évolution de la longueur de cycle (j)	Variation longueur de cycle (%)	Variation de rendement (%)
Souna	6	8.5	31.4	-8.4	-10.7	-28.3
CSM 63	9	8.5	30.7	-10.5	-11.1	-26.5
HKP	17	8.4	30.3	-11.3	-10.1	-23.5
Timari	21	8.3	29.8	-11.2	-9.4	-15.1
Somno	24	8.2	30.4	-9.9	-7.9	-21.3
Kenikeba	28	8.2	29.7	-9.0	-6.6	-18.2

Tableau 11: pour les 6 cultures considérées, valeurs de 6 paramètres caractéristiques. Les variations sont données pour le scénario +4°C/+0%. L'écart-type de longueur de cycle est pour le scénario de référence, car il vise à caractériser le photopériodisme. Les 6 variétés sont rangées par sensibilité croissante au photopériodisme.

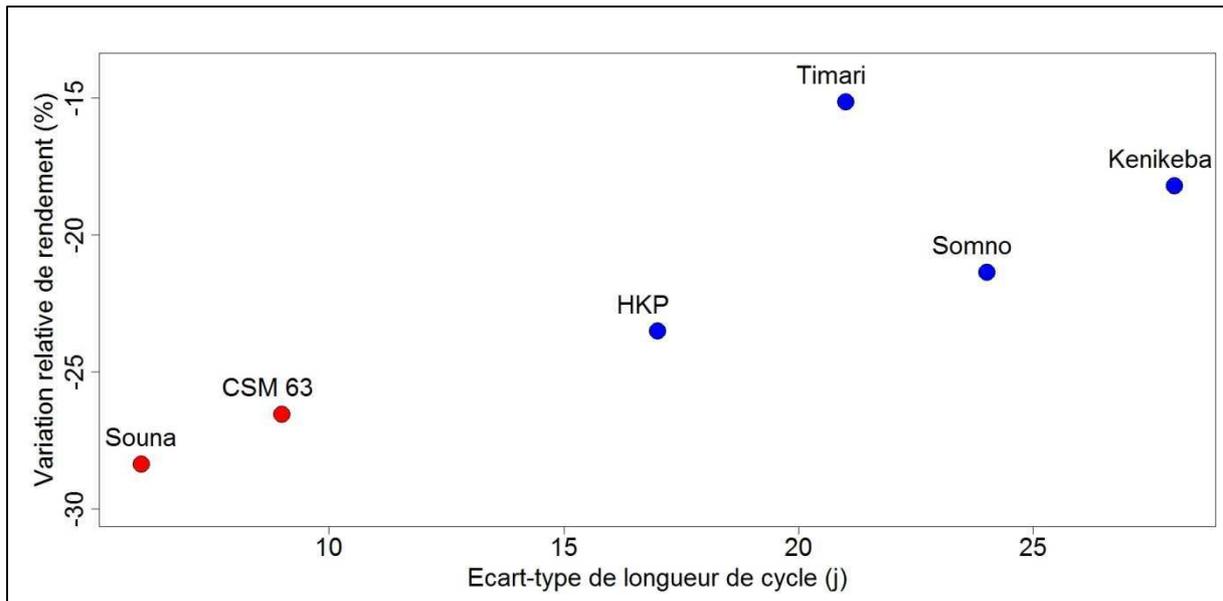


Figure 45: lien entre l'évolution de rendement et le photopériodisme (écart-type de la longueur de cycle) pour les six cultures étudiées. Les valeurs symbolisées ici sont pour le scénario +4°C/+0%

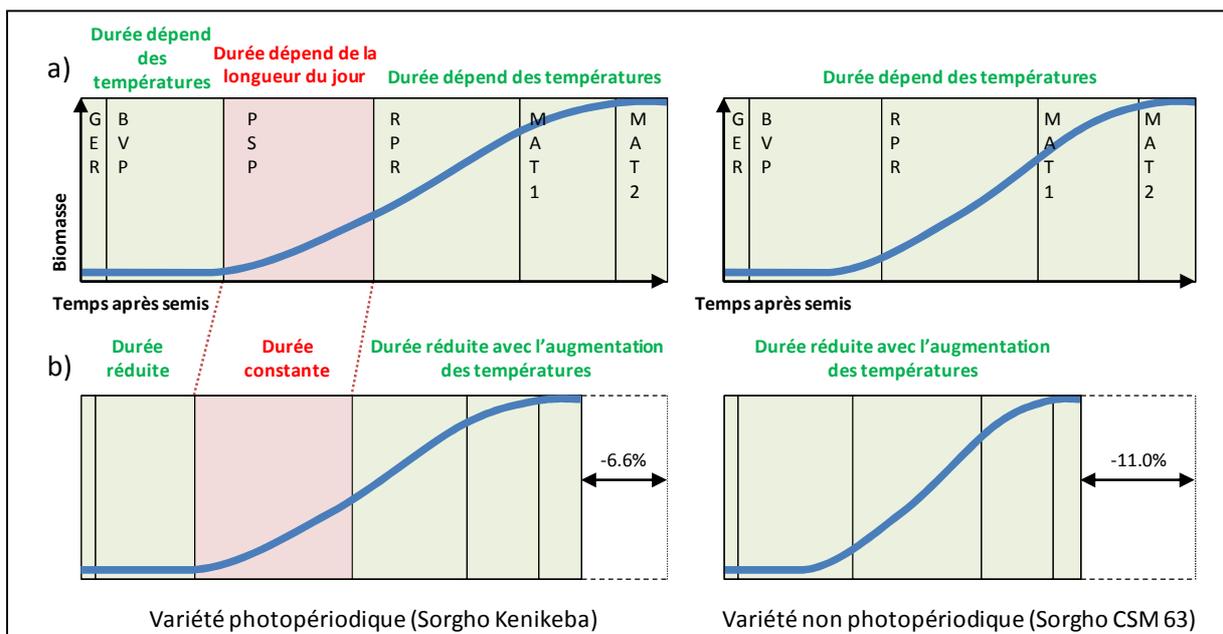


Figure 46: Schéma sur l'évolution différentielle de la longueur de cycle des variétés photopériodiques (gauche) et non photopériodiques (droite) entre la situation de contrôle (a) et le scénario où l'on prescrit un réchauffement de +4°C (b).

Il est cependant nécessaire de souligner que même si dans un monde à +4°C, l'impact du changement climatique est plus important pour les variétés à cycle fixe que pour les variétés photopériodiques, le rendement moyen de ces dernières reste dans le futur plus faible que celui des variétés à cycle constant. Néanmoins l'écart important de rendement que l'on observe dans le présent est clairement atténué et ces variétés à cycle constant présentent toujours une variabilité très forte d'une année sur l'autre et d'une localité à l'autre (Figure 47), ce qui les rend difficilement acceptables par les agriculteurs qui ont une aversion forte au risque: ceux-ci visent en effet à minimiser le risque de mauvaises années plutôt que de maximiser leur rendement moyen interannuel. Ce point sera étudié plus en détail dans le chapitre suivant.

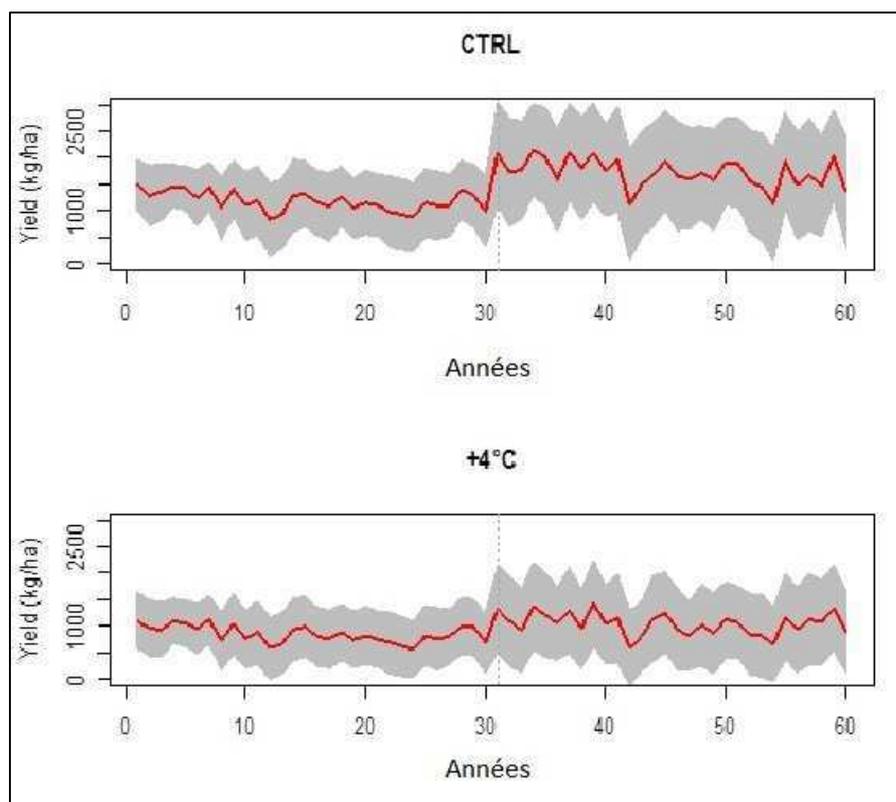


Figure 47: Rendement moyen (rouge) des variétés photopériodiques (30 premières années) et non photopériodiques (30 dernières années) pendant la période de contrôle (haut) et le scénario de réchauffement à +4°C (bas). L'enveloppe grisée représente l'écart-type spatial du rendement.

4. Conclusions

Nous avons créé dans cette étude un jeu de 35 scénarii climatiques fondé sur sept anomalies de température (+0°C à +6°C) et cinq de pluie (-20% à +20%). Nous simulons pour chacun de ces scénarii (et pour 35 stations et 30 années) les rendements de six variétés contrastées de mil et de sorgho, qu'on regroupe en deux catégories: les cycles courts et faiblement photopériodiques (CSM 63 et souna III) et les cycles longs assez sensibles à la photopériode (HKP, somno (MTDO), timari, kénikéba).

Les résultats montrent tout d'abord qu'au sein de nos gammes de scénarii, l'évolution future des rendements moyennés sur la sous-région est essentiellement négative (seuls 3 scénarii sur 34 ont une évolution positive) pouvant aller jusqu'à -41% pour +6°C et -20% de pluie. Ce signal négatif est créé par l'augmentation de température qu'une hausse (baisse) de la pluviométrie peut seulement compenser (aggraver). D'autre part, aucun des hypothétiques futurs prévus par les 22 modèles climatiques de l'AR4, pour trois scénarii d'émissions SRES (A1B, A2 et B1) et deux horizons de temps (2031/2050 et 2071/2090) ne mène, avec nos hypothèses, à une évolution de rendement positive. Ces résultats issus des projections des GCMs sont quasiment inchangés lorsqu'on réalise le même travail avec les simulations des 17 premiers GCMs de l'AR5 pour les scénarii RCP 4.5, 8.5 et 6.0. Cette diminution des rendements moyens est due à une augmentation de la demande climatique (ETO) et donc à un stress hydrique plus prononcé, à un raccourcissement de la longueur de cycle (-10 jours en moyenne pour le scénario +4°C) et à une augmentation de la respiration de maintenance par unité de biomasse (+30% pour le scénario +4°C)

Nous avons par la suite étudié un paramètre caractérisant la variation interannuelle des rendements: le coefficient de variation (CV). Si les variations du CV semblent en premier lieu décrire dans un bon nombre de cas une évolution positive (*i.e.* baisse de variabilité interannuelle), 17 scénarii sur 34 donnent des valeurs pour le CV qui ne sont pas statistiquement différentes (à 5%) du

scénario de référence. Les valeurs significativement différentes sont quant à elles quasiment toutes (15/17) négatives (*i.e.* augmentation du CV). Le futur hypothétique prévu par les GCMs est donc caractérisé par peu d'évolution du CV, et dans une moindre mesure une augmentation de celui-ci, spécialement pour l'horizon 2080. Ce peu d'évolution de la variabilité interannuelle des rendements est due à la méthode employée pour créer les scénarii climatiques, qui conserve la variabilité interannuelle. Les différences significatives proviennent quant à elle majoritairement des scénarii avec une baisse de la pluie qui provoquent un effet de seuil. Toutes les cultures qui étaient, avec le scénario de référence, dans une situation limite vont avoir avec -10% ou -20% de pluie un rendement proche de zéro (semis raté, stress hydrique).

Le rôle de la variable pluie ressort plus fortement lorsqu'on s'intéresse à la situation station par station. Ainsi, l'effet de la température est bien prépondérant dans le Sud de la sous-région (quelle que soit l'évolution de pluie, les rendements baissent) mais est plus limitée dans le Nord où les variations sont clairement dépendantes de l'évolution pluviométrique. Cette zone est en effet soumise à un stress hydrique permanent et est donc beaucoup plus sensible à la variable pluie. Cela montre que selon les horizons temporels et les scénarii considérés, les zones vulnérables peuvent évoluer. Par exemple, pour un horizon lointain et un scénario d'émission élevé (*e.g.* 2080, A2), le Sud de la région a une beaucoup plus grande probabilité de subir des pertes de rendement élevées.

Enfin, toutes les variétés étudiées ici ne connaissent pas les mêmes évolutions de rendement. L'impact est en effet plus négatif pour les sorghos et mils à cycle court et constant (CSM 63 et souna III) que pour les variétés photopériodiques (-28% vs -40% pour le scénario +4°C/-20%). Ces dernières ont en effet une partie de leur cycle qui n'est pas influencé par la température mais par la photopériode. La diminution de la longueur du cycle des variétés photopériodiques est donc plus faible et la baisse de rendement également. Cela confirme donc les résultats de la revue qui soulignent la nécessité de caractériser précisément les variétés étudiées. De plus, cela montre encore une fois l'intérêt de la prise en compte du photopériodisme pour l'élaboration de variétés futures (Soumaré *et al.* (2008)). Dans les dernières décennies, ce paramètre a en effet été largement délaissé par la recherche agronomique qui s'est beaucoup plus concentrée sur la réduction du cycle des variétés.

Cette étude comporte cependant certaines limites qu'il faudrait étudier plus en détail dans le futur. Tout d'abord, nos scénarii ne sont fondés que sur la pluie et la température alors que l'apport radiatif est, comme on l'a vu, important dans la création de biomasse. Il faudrait donc prendre en compte l'évolution de cette variable ainsi que la cohérence entre pluie, température et apport radiatif. Toujours pour les scénarii, il faudrait également étudier le décalage futur de la saison des pluies (Biasutti et Sobel (2009)) qui pourrait également entraîner des différences significatives entre variétés photopériodiques et à cycle constant. De plus nous ne tenons pas compte de l'effet fertilisant du CO₂: même si celui-ci est modéré pour le mil et le sorgho, les résultats peuvent tout de même être légèrement différents. D'autre part, nous ne considérons pas l'adaptation: il pourrait être souhaitable de comparer le revenu des agriculteurs pour la période de référence et pour le futur en supposant que les agriculteurs choisissent parmi les six variétés la meilleure combinaison possible. Enfin, du point de vue de la modélisation agronomique, il serait important de voir dans quelle mesure les mécanismes physiologiques des modèles comme SARRA-H restent valables dans des univers nettement plus chauds (de +4°C à +6°C par exemple).

Chapitre 4: Evaluation *ex-ante* de la valeur des prévisions saisonnières pour les cultivateurs de mil au Niger

Communications relatives à ce chapitre:

- Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P., Baron, C., Alhassane, A., Traoré, S. B., Muller, B. (2011). An ex-ante evaluation of the use of seasonal climate forecasts for millet growers in SW Niger. *International Journal of Climatology*
- Roudier, P., Sultan, B., Alhassane, A. (2011). Prédire la pluie pour réduire l'insécurité alimentaire. *Fiche d'actualité scientifique IRD n°372*

Résumé:

Ce chapitre vise à calculer la valeur de différents types de prévisions saisonnières pour les cultivateurs de mil au Niger. Nous quantifions ainsi la valeur potentielle de trois types de prévisions de la catégorie du cumul pluviométrique de la saison à venir: (i) une prévision imparfaite (et avec une précision réaliste) du tercile de la pluie (plutôt sec, normal ou humide), (ii) une prévision parfaite de ce tercile, et (iii) une prévision parfaite du tercile à laquelle on ajoute une prévision de la date de début et de fin de la saison pluvieuse. Afin de laisser à l'agriculteur un large choix de réactions à la prévision, nous définissons 18 itinéraires culturaux différents (trois variétés de mil, trois dates de semis et deux niveaux de fertilisation). Les rendements correspondants sont calculés en utilisant le modèle agronomique SARRA-H puis convertis en utilité en tenant compte de l'aversion au risque des agriculteurs sahéliens. Le bénéfice de la prévision est alors défini comme l'augmentation relative de revenu par rapport à la situation sans prévision. Les simulations sur une période de 18 ans (1990/2007) montrent toutes un bénéfice de la prévision pour la culture du mil, quel que soit le type de prévision considéré. Ce bénéfice est logiquement le plus faible avec la prévision imparfaite (+6.9%), légèrement supérieur avec une prévision parfaite (+11%) et atteint +34% avec des informations supplémentaires sur le début et la fin de la saison: ces informations permettent en effet d'utiliser de nouvelles stratégies culturales.

1. Introduction

Les deux chapitres précédents ont montré que le climat en Afrique de l'Ouest, et notamment les précipitations, ont connu dans le passé de fortes variations avec un impact important sur les rendements agricoles: ceux-ci ont tendance, au Niger par exemple, à diminuer depuis 50 ans (-9% pour le mil entre 1961/1970 et 1998/2007, données FAOSTAT). Si la production de mil dans ce pays a tout de même augmenté sur cette période, cela est dû à une augmentation de la superficie des terres cultivées (voir Figure 16, page 46). Cette pratique n'étant pas reproductible à l'infini, les aléas climatiques futurs auront un impact encore plus important sur la production. De plus, le climat futur de la sous-région risque de mener à des baisses de rendement significatives pour les cultures pluviales.

On a vu dans l'introduction générale que dans un contexte de demande croissante, il semble fondamental de mettre en place des stratégies robustes à un climat changeant et qui permettent d'augmenter le rendement moyen des cultures, mais également de diminuer l'impact de la variabilité interannuelle. Parmi les nombreuses options disponibles (*e.g.* irrigation, nouvelles cultures) nous avons choisi de tester l'utilisation de prévisions climatiques saisonnières, qui permettent via des choix adéquats d'atténuer l'impact de la variabilité climatique et d'augmenter le rendement moyen interannuel (Meinke *et al.* (2005)). Un tel type de stratégie, paraît particulièrement utile étant donné la variabilité du climat actuel, et doit être plébiscité dans un contexte de climat changeant et incertain (Hallegatte (2009)). Les prévisions saisonnières restent en effet toujours pertinentes quelles que soient les évolutions de la pluviométrie future et la gamme du réchauffement.

Grâce aux progrès effectués dans le domaine des sciences climatiques lors des dernières décennies, ces prévisions à l'échelle saisonnière sont désormais robustes dans de nombreuses régions du monde (Hansen (2002)) et ont d'ores et déjà montré des résultats prometteurs lors d'essais pilotes (Patt *et al.* (2005); Hellmuth *et al.* (2007)). Les prévisions saisonnières se fondent globalement sur le fait que les températures des eaux de surface des océans (SSTs pour Sea Surface Temperatures), qui évoluent plutôt lentement par rapport à la température de l'atmosphère, influencent le climat et peuvent ainsi engendrer des précipitations (ou sécheresse) plusieurs semaines après, à des endroits qui peuvent être très éloignés. Ces prévisions sont réalisées avec des méthodes statistiques simples reliant des indices climatiques (souvent fondés sur des SSTs) aux précipitations, en un endroit donné (Letson *et al.* (2009); Patt *et al.* (2005)) et/ou avec des outils plus complexes comme les modèles climatiques globaux ou régionaux (GCMs/RCMs, *e.g.* (Hansen *et al.* (2009); Cooper *et al.* (2008))) qui modélisent les réponses de l'atmosphère aux SSTs ou à d'autres indicateurs de l'état de la surface terrestre (Hansen (2002)). En Afrique de l'Ouest, les agences météorologiques nationales collaborent avec les groupes de prévisionnistes européens et américains depuis 1998 à travers le forum annuel régional PRESAO (PREvisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest; Hamatan *et al.* (2004), voir www.acmad.ne). Ce forum donne chaque printemps une prévision de la saison des pluies à venir, en utilisant différentes sources d'informations comme des GCMs 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 (Figure 48) de manière à ce que les utilisateurs puissent modifier leurs pratiques culturelles.

Bien que ces prévisions existent depuis plus de dix ans, l'évaluation de leurs bénéfices potentiels est encore très rare (Sultan *et al.* (2010); Meza *et al.* (2008)), surtout pour les cultures vivrières. En effet, le taux d'utilisation de l'information par les agriculteurs est encore faible dans la sous-région et ne permet donc pas de réaliser une étude *ex post* robuste qui évaluerait les bénéfices de l'utilisation d'une telle information (Meza *et al.* (2008)). Ce chapitre est, à notre connaissance, la première tentative d'évaluation de la valeur des prévisions saisonnières pour les cultures vivrières en Afrique de l'Ouest. Pour cela, nous réalisons une évaluation *ex ante*. Ce type de méthodologie permet premièrement de montrer dans quelles conditions les bénéfices peuvent être les plus importants et rendent ainsi possible la mobilisation de fonds et de partenaires nécessaires, par

exemple pour la diffusion de l'information (Thornton *et al.* (2006); Meza *et al.* (2008)). Deuxièmement, cela permet d'évaluer l'efficacité de nouveaux indices climatiques. Ce dernier point est particulièrement pertinent ici puisque les prévisions diffusées en Afrique de l'Ouest (*e.g.* PRESAO) concernent majoritairement le cumul pluviométrique saisonnier, alors que le début et la fin de la saison des pluies sont des informations qui pourraient entraîner des changements de pratiques culturales notoires chez les agriculteurs (Ingram *et al.* (2002)).

Ainsi, nous nous intéressons particulièrement ici au cas du mil [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] au Niger. Cette céréale est la première culture vivrière du pays (75% de la production nationale totale) et est cultivée de manière entièrement pluviale dans des exploitations familiales disposant de peu d'intrants (Amadou *et al.* (1999); données FAOSTAT et Soler *et al.* (2008)). Afin de calculer la valeur des prévisions saisonnières, nous: (i) définissons des stratégies culturales potentielles en réaction à cette information, (ii) calculons le rendement associé à chaque stratégie en utilisant le modèle agronomique SARRA-H, (iii) calculons le revenu de chaque stratégie et (iv) simulons le comportement de l'agriculteur en utilisant une fonction d'utilité CRRA (Constant Relative Risk Aversion). Afin de rester cohérent avec les informations de type PRESAO, nous utilisons ici une prévision du cumul saisonnier de pluie en trois catégories (fondées sur les terciles de la distribution): saison humide (tercile supérieur), normale (tercile intermédiaire) et sèche (tercile inférieur). Ainsi, nous prenons en compte trois scénarii de prévisions: (i) une prévision imparfaite de la catégorie de pluie, fondée sur des indices de températures de la mer et ayant pour but de simuler un précision proche de la réalité, (ii) une prévision parfaite de la catégorie de pluie et (iii) une prévision parfaite de cette catégorie à laquelle on ajoute une prévision des dates de démarrage (également appelé *onset*) et de fin de la saison (*offset*) à venir. La valeur de chaque type d'information est calculée sur une période de 18 ans (1990/2007).

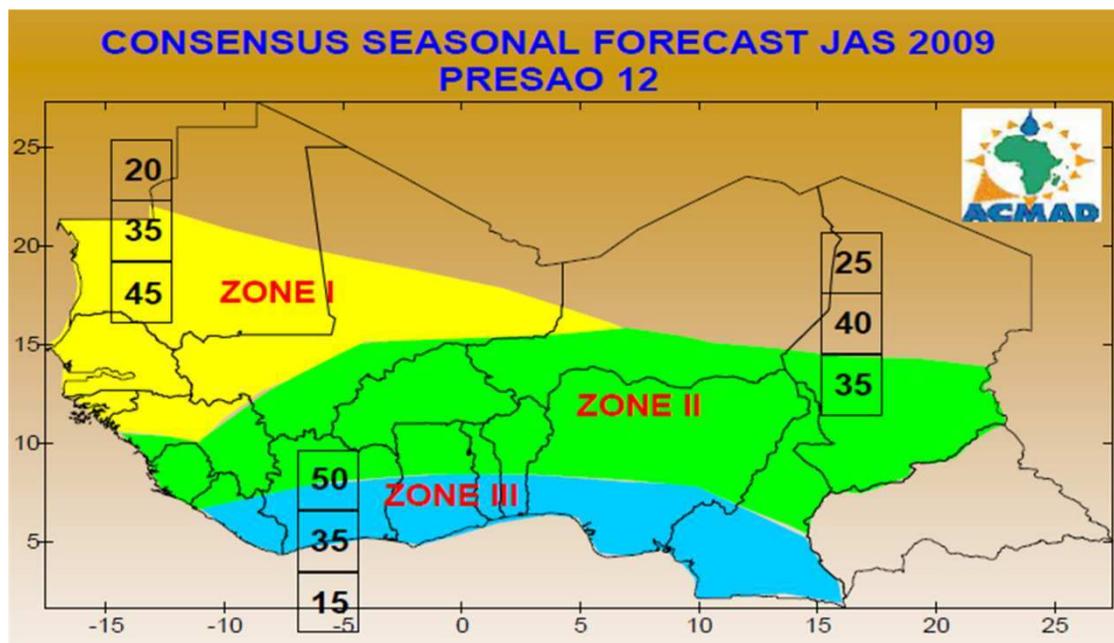


Figure 48: prévision saisonnière diffusée par le programme PRESAO pour le cumul pluviométrique Juillet/août/septembre de l'hivernage 2009 (www.acmad.ne)

2. Méthodes et zone d'étude

2.1 Zone et données

Ce chapitre se focalise sur le sud-ouest du Niger, situé dans la bande soudano-sahélienne (Abdoulaye et Sanders (2005)). Comme on l'a vu, cette région est caractérisée par une saison pluvieuse courant approximativement de juin à septembre et apportant environ 500mm/an, avec une grande hétérogénéité spatiale (Balme *et al.* (2005)). Dans cette zone, nous disposons d'un réseau de 30 stations pluviométriques et une météorologique (Figure 49) dépendant du programme AMMA-CATCH Niger et fournissant des données au pas de temps journalier sur la période 1990/2007. Plus précisément, notre étude se concentre sur dix de ces villages où nous disposons de données de rendement à la parcelle (voir chapitre 1).

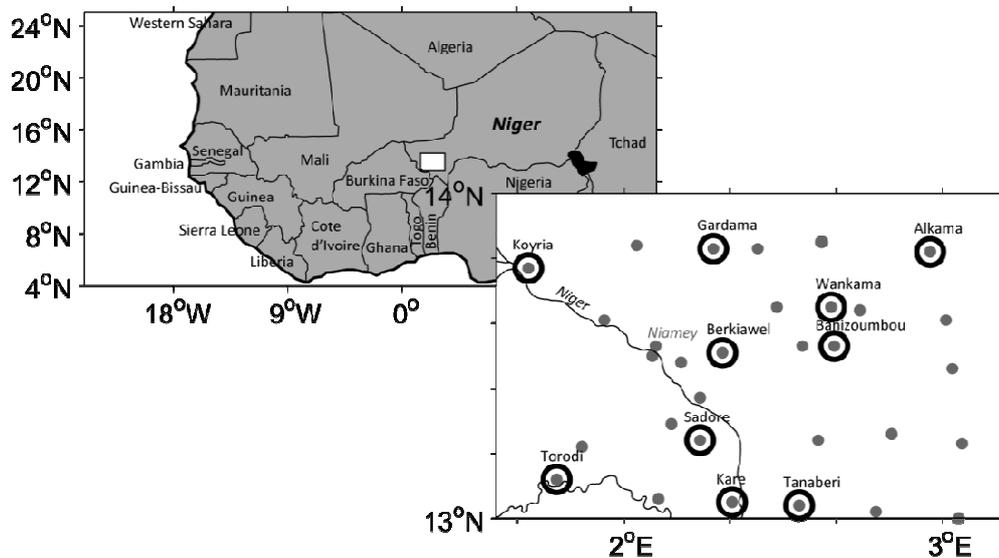


Figure 49: zone d'étude. Les points noirs représentent les stations pluviométriques et les cercles les villages où on simule les rendements.

Afin de simuler les rendements du mil, nous utilisons le modèle agronomique SARRA-H (voir chapitre 1 pour une description), spécialement conçu pour représenter la croissance et le rendement des céréales en milieu tropical. Etant donné que SARRA-H ne calcule que le rendement potentiel des cultures, sans tenir compte des pertes extérieures au climat, nous introduisons un coefficient de correction du rendement. Ce coefficient a pour but de baisser la valeur des rendements lorsque le semis et la variété de mil considérés ne sont pas adaptés à la saison pluvieuse. Pratiquement, on définit deux cas où le couple (variété, semis) n'est pas adapté à une saison donnée:

- Lorsque le premier jour de la phase de maturité de la culture a lieu plus de 20 jours avant la date de fin de la saison. En effet, Kouressy *et al.* (2008) soulignent pour le sorgho que lorsque la floraison est trop précoce dans l'hivernage, il y a fréquemment des pertes dues aux adventices²⁰, aux oiseaux ou à diverses maladies (excès d'eau). Ce comportement pour le sorgho se retrouve également pour le mil (B. Haussmann, communication personnelle).

- Lorsque la date de semis se situe après le début de la saison. Cela peut réduire les rendements finaux à cause du lessivage de l'azote, de températures plus basses, de pluies trop fortes pouvant détruire les jeunes pousses, et principalement de l'invasion d'adventices (Traore *et al.* (2007)).

²⁰ plantes qui poussent sans avoir été semées ("mauvaises herbes")

Lorsqu'un couple (variété, date de semis) ne remplit pas les deux critères, on diminue le rendement associé en appliquant un coefficient de correction empirique k (Figure 50). Ainsi: Rendement utilisé= k *rendement brut calculé. Notons que nous avons testé plusieurs manières d'abaisser la valeur de ces rendements. Nous avons fondé notre choix sur la comparaison entre le scénario de contrôle et les données observées dont nous disposons sur 2004/2007. Par exemple, si on n'utilise aucun coefficient de correction, le scénario de contrôle révèle une surreprésentation de la variété souna, ce qui n'est pas observé *in situ*. De plus, nous avons introduit un coefficient k dont la valeur évolue progressivement pour éviter un effet de seuil aberrant qui signifierait, par exemple, qu'on enlève 40% de rendement à une variété semée le jour $j+1$ alors que son rendement aurait été intact si elle avait été semée le jour j .

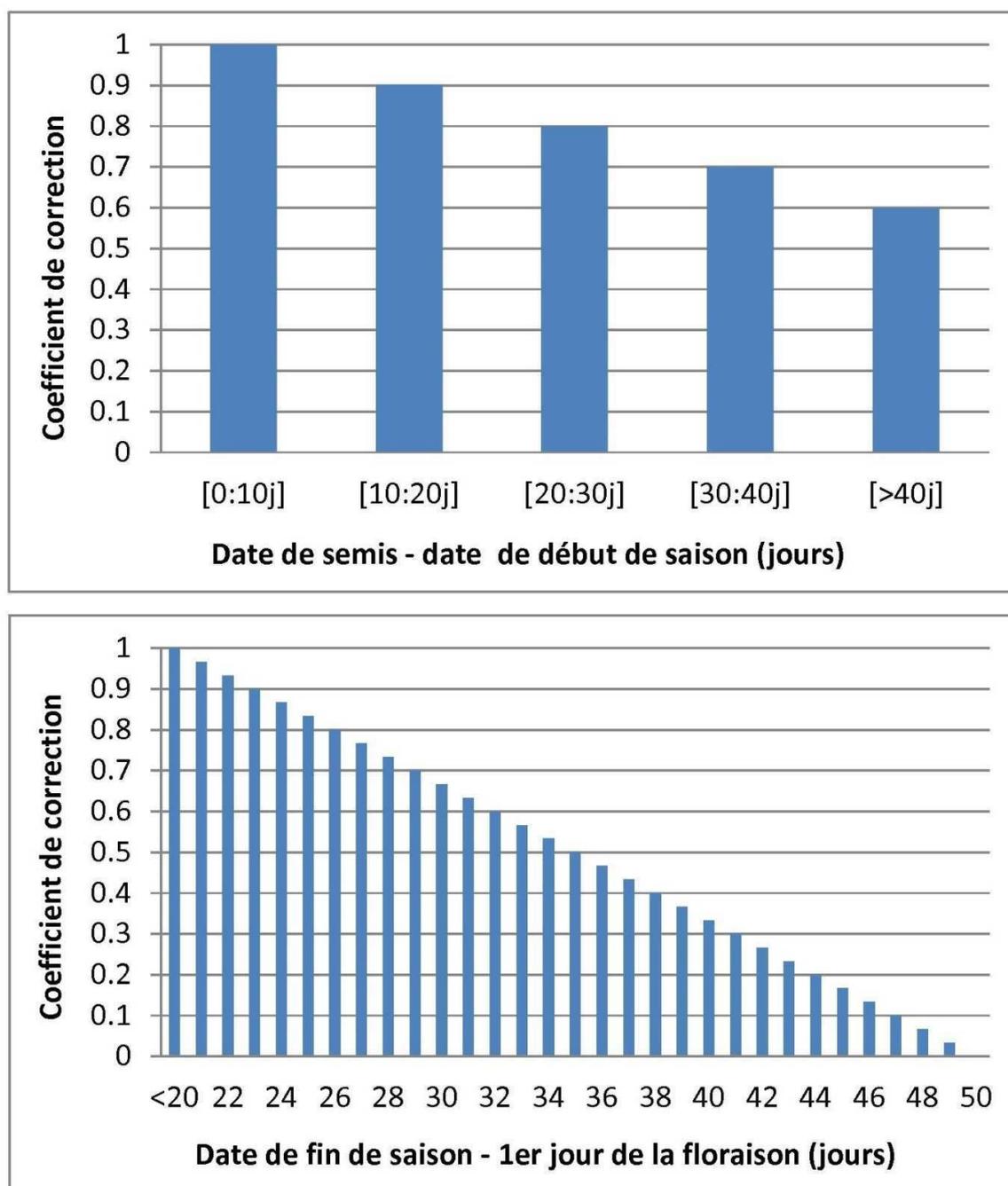


Figure 50: valeurs du coefficient de correction k utilisés pour modifier la valeur des rendements calculés par SARRA-H (rendement modifié= k *rendement SARRAH) pour l'adaptation à la fin de la saison (bas) et à son démarrage (haut)

2.2 Demande des agriculteurs sur les prévisions saisonnières et moyens de réactions

Afin de calculer la valeur des prévisions saisonnières, il est nécessaire de définir au préalable les stratégies culturales à la disposition de l'exploitant. Meza *et al.* (2008) soulignent à ce propos que les évaluations *ex ante* des prévisions saisonnières prennent généralement en compte trop peu de stratégies d'adaptation 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. Si nous n'avons pas trouvé de documents spécifiques au Niger documentant ce que les agriculteurs pourraient faire en réaction à une prévision, il existe cependant des informations de ce type sur d'autres pays d'Afrique (Tableau 12).

Ainsi, selon Roncoli *et al.* (2009), les paysans burkinabè utiliseraient de 0 à 4 stratégies, avec 38% d'entre eux seulement une et 27% deux stratégies. Certaines études (*e.g.* O'Brien *et al.* (2000)) prétendent 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. Celle-ci doit être facile à comprendre et doit surtout être donnée au moment opportun, *i.e.* 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. Nous considérons que ce point est en dehors du champ d'investigation de ce chapitre, c'est pourquoi nous supposons que les exploitants utilisent la prévision diffusée.

Finalement, le Tableau 12 montre que 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, la fin de la saison pluvieuse, la quantité totale de pluie et sa répartition dans la saison. Nous considérons donc trois types de réponses aux prévisions, résumés en Figure 51.

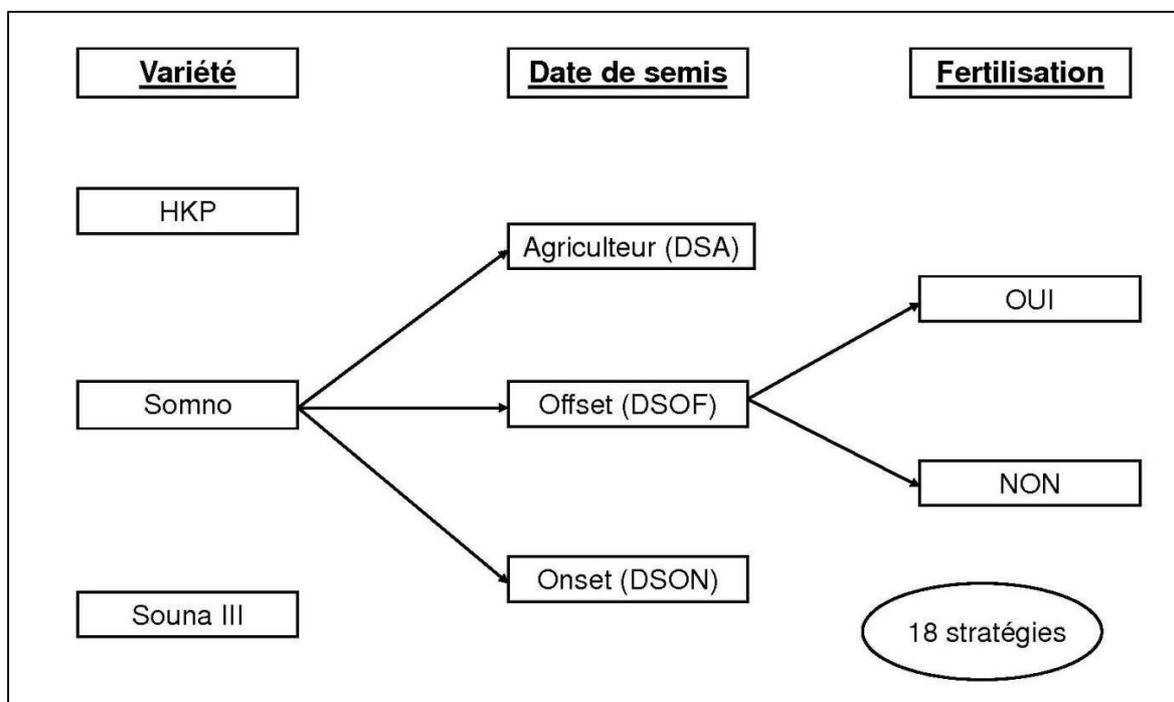


Figure 51: description des 18 stratégies disponibles en réaction à la prévision

Etude	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) ²¹	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	Adjuster la densité de semis Faire varier le ratio maïs / sorghum planté	Les deux paramètres sont utilisés dans un modèle. D'autres stratégies sont décrites brièvement.
Luseno <i>et al.</i> (2003)	Ethiopie et Kenya	"Adjuster 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

Tableau 12: revue des stratégies d'adaptation possibles en réponse aux prévisions saisonnières (citées par les agriculteurs).

2.2.1 Choix de la variété de mil

Trois variétés de mil sont utilisées ici: HKP, somno (MTDO) et souna III. Les deux premières sont utilisées *in situ* (Bezanson *et al.* (2009)), avec une majorité de HKP. Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, elles sont toutes les deux photopériodiques (somno plus que HKP), contrairement à la troisième, souna III qui a une longueur de cycle fixe et également un potentiel de

²¹ d'autres stratégies sont décrites p.343 de ce papier selon le type de prévision.

rendement plus élevé. Cependant, les agriculteurs ont tendance dans cette région à ne pas l'utiliser à cause de la forte variabilité interannuelle de son rendement et des pertes potentielles dues à une maturation trop précoce (de Rouw (2004)). Ces trois variétés ont différentes longueurs de cycle: environ 80 jours pour Souna III, 90/95 pour HKP et 120 jours pour somno (moyenne sur le Niger). Bien que souna III ne soit pas utilisée *in situ*, nous l'avons choisie pour son rendement potentiel élevé et son cycle court et fixe. Avec des prévisions, ce cultivar pourrait ainsi être utilisé pour des saisons courtes.

2.2.2 Choix de la date de semis

Trois dates de semis sont définies dans ce chapitre. Notons que quelle que soit la date de semis, SARRA-H peut simuler un re-semis si le premier semis ne prend pas (*i.e.* si l'évolution de biomasse est négative dans les 20 jours suivant le semis):

- la Date de Semis Agriculteur (DSA) est simulée par SARRA-H (voir chapitre 1). Elle simule les pratiques existantes des agriculteurs qui sèment à la première pluie importante.

- la Date de Semis fondée sur l'ONset (DSON): le mil est semé au démarrage de la saison (*onset*), comme il est défini par Sivakumar (1988) et utilisé par plusieurs auteurs (Balme *et al.* (2005) qui le définissent comme "onset agricole"). Cette date de semis, à la différence de l'onset défini par les climatologues (*e.g.* Sultan *et al.* (2005)), a été créée pour obtenir des rendements optimaux: on suppose donc qu'il peut être utile aux exploitants.

- la Date de Semis fondée sur l'OFset (DSOF) vise à résoudre les problèmes de pertes quand la maturité de la culture se fait trop tôt dans la saison des pluies, comme on l'a décrit précédemment. La date de fin de saison (*offset*) est calculée suivant le critère de Sivakumar (1988): 20 jours consécutifs sans pluie après le 1er septembre. En se fondant sur Kouressy *et al.* (2008) qui considèrent qu'une culture (avec sa date de semis) n'est pas adaptée si le premier jour de la phase de maturité a lieu plus de 20 jours avant l'offset, nous créons une nouvelle date de semis en ajustant la premier jour de maturité 10 jours avant l'offset. Cette valeur de 10 jours est optimale car pour HKP et Somno la longueur de cycle a une variation d'environ 20 jours. Finalement, la DSOF est calculée en soustrayant à la date de fin de saison: 97 jours pour HKP, 116 jours pour somno et 67 jours pour souna III. Cette date de semis est particulièrement pertinente pour souna car les cultivars photopériodiques (HKP et Somno) modifient leur cycle pour fleurir plus ou moins à la même date chaque année. Cependant, leur sensibilité à la photopériode est tout de même limitée (surtout pour HKP) et il existe une variation de la date de maturité d'année en année. Donc, même si la DSOF est plus efficace avec souna (cycle constant), elle est également applicable pour HKP et somno. Soulignons que DSON et DSOF nécessitent une information parfaite sur l'onset et l'offset de la saison.

2.2.3 Choix du niveau de fertilisation

Enfin, même si les fertilisants chimiques ne sont pas utilisés de façon importante au Niger, nous proposons cette option culturale comme réponse aux prévisions. En effet, avec les prévisions saisonnières, les fertilisants pourraient être utilisés lorsqu'une année humide est prévue. Nous supposons que les agriculteurs peuvent acheter un engrais commun, le NPK 15-15-15²². Selon une étude de l'ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics) citée par la FAO (2002), nous faisons l'hypothèse qu'ils utilisent 60 kg/ha de NPK (microfertilisation). C'est une pratique commune qui donne des résultats probants. Nous prenons aussi en compte l'apport par les paysans de matière organique comme la fumure (sur environ 30% des parcelles selon les données observées). Dans les simulations, la fumure est gratuite et utilisée tous les ans au taux observé (30%).

²² "15-15-15" représente la part relative (%) respectivement d'azote (N), phosphore (P) et potassium (K) présente dans l'engrais

Ainsi, dans tout le reste du chapitre, "NFert" signifie "pas d'engrais chimique" et "Fert" "avec engrais chimique". Dans les deux cas, il y a une fertilisation organique gratuite.

En se fondant sur les trois paramètres décrits précédemment (variété, date de semis, utilisation d'engrais), nous définissons 18 stratégies culturales (Figure 51). On simule par la suite avec SARRA-H le rendement pour chaque stratégie, pour chacune des dix stations et pour les années 1990/2007.

2.3 Les trois types de scénarii considérés

2.3.1 Prévision imparfaite du tercile du cumul de pluie

Notre premier objectif était d'évaluer la prévision saisonnière telle qu'elle est diffusée par les services opérationnels à travers le forum PREASO pour quantifier le bénéfice du système existant. Cependant, les prévisions de PREASO (archivées en ligne sur www.acmad.ne) ne sont disponibles qu'à partir de 1998 (date du 1^{er} forum PREASO) ce qui limiterait alors notre période d'étude à 1998/2007, au lieu de 1990/2007. Nous choisissons donc de construire notre propre modèle de prévision statistique, dont la prévision s'approcherait de celle de PREASO, pour prévoir la pluie au Niger. Plusieurs études empiriques ont déjà été réalisées en utilisant les températures de surface de l'océan (SST pour Sea Surface Temperature) pour prévoir le cumul saisonnier au Sahel (Folland *et al.* (1991); Ward (1998); Ward *et al.* (2004); Sultan *et al.* (2010)).

Dans cette étude, nous élaborons des prévisions en suivant la méthodologie de ces dernières études et en se basant sur les données mensuelles ERSST (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature) du National Climatic Data Center (NCDC). Ce jeu de données est construit en utilisant les SST les plus récentes de l'ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) et des méthodes statistiques élaborées qui permettent une reconstruction fiable malgré peu de données (Smith *et al.*, 2008). On garde ici seulement les données de SST sur la période 1990/2007 puis on calcule trois cartes de corrélation entre la pluie saisonnière au Niger et les SST respectivement en mars, avril et mai. Les cartes de corrélation sont par la suite utilisées pour sélectionner un jeu de prédicteurs qui sont des moyennes des SST sur des régions spécifiques, connues pour être liées avec la mousson ouest-africaine (principalement dans les océans Atlantique et Pacifique (Ward (1998), Giannini *et al.* (2003)). On choisit les zones où les coefficients de corrélation sont les plus élevés. Ces prédicteurs sont par la suite utilisés pour construire par étape un modèle de régression linéaire multivariée afin de prédire le cumul pluviométrique au Niger. La forme générale du modèle multivarié est présentée dans l'équation 2.

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p \quad (\text{Eq.2})$$

Avec Y la pluie saisonnière cumulée à prévoir, α une constante, et chaque terme en β un coefficient de régression pour le prédicteur SST correspondant, pour un mois donné. Une fois qu'un premier modèle est construit avec tous les prédicteurs, on réduit leur nombre en minimisant la variance afin de réduire la colinéarité entre les prédicteurs. De la même manière, on applique des méthodes ascendantes et descendantes afin de choisir le meilleur jeu de prédicteurs parmi ceux initialement prévus. Finalement, notre modèle se fonde sur deux prédicteurs en avril (un dans le Pacifique et un dans l'Atlantique) avec un coefficient de corrélation multiple $R=0.70$. On classe alors la pluie prévue en trois catégories possibles: "humide", "normale" ou "sèche" quand le cumul pluviométrique prévu est compris (respectivement) dans le tercile supérieur, intermédiaire ou inférieur de la distribution constituée du cumul des 18 années. Etant donné que cette prévision saisonnière contient des erreurs (une année humide peut-être prévue comme sèche par exemple), on appelle ce scénario de prévision "imparfait" (notation "Impft"). Rappelons ici que notre objectif n'est pas de construire le meilleur modèle de prévision des pluies au Sahel mais plutôt de faire une prévision fondée sur l'état de l'art des relations empiriques entre les SST et les pluies qui servira alors de référence dans l'évaluation des bénéfices de la prévision pour l'agriculture.

2.3.2 Prédiction parfaite du tercile du cumul de pluie

Afin de voir ce qu'apporterait l'amélioration de la précision d'une telle prédiction, on considère un autre scénario (appelé "Pft" par la suite) avec une prédiction parfaite de la catégorie de la future saison pluvieuse (humide, normale ou sèche). Pour cela, on classe 1990/2007 en trois groupes de même taille (six années chacun) en fonction de la pluie saisonnière cumulée. Les différences dans la prédiction saisonnière attribuée à chaque année entre les scénarii "Impft" et "Pft" sont décrites dans le Tableau 13. On remarque notamment que les deux scénarii donnent la même prédiction pour neuf années (4 sèches, 2 normales et 3 humides) et que les différences importantes (année sèche pour une année humide par exemple) sont peu nombreuses (1/18).

		Prédiction imparfaite « Impft »		
		Catégorie	Sèche	Normale	Humide
Prédiction parfaite « Pft » (observations)	Sèche	4	2	0
	Normale	1	2	3
	Humide	1	2	3

Tableau 13: différences entre la prédiction parfaite et imparfaite

2.3.3 Prédiction parfaite de la quantité de pluie cumulée et informations sur la date de début et de fin de l'hivernage.

Etant donné que les dates de début et de fin de la saison des pluies sont très importantes pour les agriculteurs (Laux *et al.* (2008)) et ont été étudiées récemment (Sultan et Janicot (2003); Druyan *et al.* (2009)), on considère un scénario amélioré "Pft++" qui fournit la même prédiction parfaite du tercile que "Pft" mais qui donne en plus des informations sur le début et la fin de la saison des pluies. Ces informations climatiques permettent l'utilisation des dates de semis DSON et DSOF comme réponse aux prévisions. Ce scénario "Pft++" permet ainsi d'évaluer l'intérêt d'introduire de nouvelles informations climatiques.

2.3.4 Scénario de contrôle

Enfin, nous définissons un scénario de contrôle ("Ctrl") où aucune prédiction n'est disponible. Il est utilisé comme référence, afin de pouvoir quantifier les bénéfices de chaque scénario de prédiction. Pour résumer, quatre scénarii sont étudiés (Tableau 14): Impft, Pft, Pft++ et Ctrl.

Scénario	Type de prédiction	Dates de semis permises	Cultivars possibles	Fertilisation	Commentaires
"Ctrl"	Aucune	Seulement DSA	HKP/Somno /Souna	Oui/Non	Même stratégie chaque année
"Impft"	Prédiction imparfaite de la catégorie de la pluie saisonnière	Seulement DSA	HKP/Somno /Souna	Oui/Non	Choix du cultivar et du niveau de fertilisation pour chaque type d'année
"Pft"	Prédiction parfaite de la catégorie de la pluie saisonnière	Seulement DSA	HKP/Somno /Souna	Oui/Non	Choix du cultivar et du niveau de fertilisation pour chaque type d'année
"Pft++"	Prédiction parfaite de la catégorie de la pluie saisonnière + onset et offset de la saison	DSA/DSON /DSOF	HKP/Somno /Souna	Oui/Non	- Choix du cultivar et du niveau de fertilisation pour chaque type d'année - Adaptation de la date de semis fondée sur onset /offset.

Tableau 14: description des quatre scénarii de prévisions utilisés

2.4 Règle de décision des agriculteurs

Nous supposons que l'exploitation-type que nous considérons ici dispose de trois parcelles de 0.5 ha chacune. Cela permet à l'agent considéré dans la modélisation de réaliser sur chaque parcelle des pratiques culturales différentes (toutes les combinaisons sont considérées). Par exemple, l'exploitant peut prendre une décision risquée sur 0.5 ha (rendement élevé mais forte variabilité interannuelle) et garde les deux autres parcelles comme "filet de sécurité" (rendement moyen, faible variabilité).

On simule par la suite la décision des agriculteurs de choisir la meilleure stratégie culturale en réponse à chacun des scénarii de prévision disponibles. Dans la réalité, la "meilleure stratégie" n'est pas celle qui vise à maximiser leur revenu moyen mais plutôt celle qui minimise le risque d'être dans une situation périlleuse à cause de mauvaises récoltes (de Rouw (2004); Brüntrup (2000)). Le challenge est alors de trouver des stratégies sûres qui augmentent également le revenu moyen.

Il existe différentes façons de simuler l'aversion au risque (voir Ogurtsov *et al.* (2008) pour une revue). Nous faisons ici l'hypothèse que les agriculteurs maximisent leur utilité via une fonction CRRRA (Constant Relative Risk Aversion, Eq. 3) qui a été employée pour des cas similaires dans la littérature scientifique (*e.g.* Holt et Laury (2002); Letson *et al.* (2009)). 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.

$$U(x) = \frac{x^{1-\varphi}}{1-\varphi}, x > 0, \varphi \neq 1 \quad (\text{Eq. 3})$$

Pour chaque station $st=1, \dots, 10$, pour chaque scénario $sc = \text{Impft}, \text{Pft}, \text{Pft++}, \text{Ctrl}$ et chaque prévision f , on cherche l'itinéraire cultural it qui maximise l'utilité attendue EU , décrite dans l'équation 4. Il faut souligner que nous utilisons ici la fonction $U(x+W)-U(W)$ afin d'avoir une utilité nulle quand le revenu des agriculteurs est nul.

$$EU^{st,sc,f} = \frac{1}{1-\varphi} * \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left(\sum_{j=1}^3 Y_{i,j}^{st,sc,f}(it_j^{st,sc,f}) \right) + W \right)^{(1-\varphi)} - W^{(1-\varphi)} \right] \quad (\text{Eq.4})$$

$\varphi \geq 0, \varphi \neq 1, W \geq 0$

Où Y est le revenu de l'exploitation dû à la production de mil (voir ci-dessous pour une description approfondie), $i \in (1 \dots n)$ représente l'année ($n = 18$ si $sc = \text{Ctrl}$, autrement $n = 6$), $j \in (1, 2, 3)$ est le numéro de la parcelle, W est une constante (FCFA), utilisée pour ne pas avoir de valeurs négatives, et φ est le paramètre d'aversion au risque. On étudie par la suite ces variables et paramètres plus en détail.

$Y_{i,j}^{st,sc,f}(it_j^{st,sc,f})$ est exprimé en FCFA, l'unité monétaire du Niger (1 € = 655.957 FCFA). C'est la marge brute, *i.e.* la valeur de la production de mil, moins le coût des fertilisants (pour les stratégies utilisant des engrais chimiques). Les détails du calcul sont données en équation 5:

$$Y_{i,j}^{st,sc,f}(it_j^{st,sc,f}) = P_i \times Q_{i,j}^{st,sc,f}(it_j^{st,sc,f}) - C_i \times F_j^{st,sc,f}(it_j^{st,sc,f}) \quad (\text{Eq.5})$$

Où P est le prix de vente du mil (FCFA/kg, données FAOSTAT), Q la quantité produite (kg), C est le coût des engrais par parcelle (FCFA/kg, données de la Centrale d'approvisionnement de la république du Niger) et F est la quantité d'engrais pour chaque parcelle (peut être nulle). On rappelle que, d'après une étude de l'ICRISAT citée par la FAO (2002), on suppose que les agriculteurs utilisent 60kg/ha de NPK 15-15-15. La constante W , employée pour éviter les valeurs négatives représente généralement le capital initial disponible (Wakker (2008)), ou le revenu annuel moyen. Comme nous

ne disposons pas de données de capital des agriculteurs au Niger, nous choisissons la seconde option. On calcule alors ce gain moyen annuel W sur toutes les stations, sur toute la période et pour une stratégie culturale utilisant seulement la date de semis traditionnelle (DSA), le cultivar HKP et pas de fertilisation chimique. Ces pratiques sont de loin les plus utilisées *in situ*. Finalement, on obtient $W=60700$ FCFA.

ϕ est le paramètre d'aversion au risque. Plus il est élevé, plus l'agriculteur a une forte aversion pour le risque; $\phi = 0$ signifie qu'il est neutre vis-à-vis du risque. Diverses méthodes ont été utilisées pour estimer ce paramètre ϕ et les résultats empiriques varient beaucoup. Une récente estimation de Chiappori et Paiella (2008) (p.19) conclut que "la médiane de la distribution du paramètre d'aversion relative au risque pourrait être légèrement inférieure à deux". Schechter (2007), en utilisant des données issues du milieu rural au Paraguay, conclut que lorsque les individus ne peuvent pas épargner (une hypothèse plausible en Afrique), le paramètre moyen d'aversion relative au risque est 1.92. En se fondant sur ces études récentes, nous utilisons donc $\phi = 2$ dans ce chapitre. Cependant, comme d'autres papiers (Holt et Laury (2002)) trouvent des valeurs plus basses, nous avons également testé une aversion au risque plus faible ($\phi = 1.5$ et $\phi = 1$). Comme les résultats obtenus avec ces deux valeurs sont très similaires avec ceux trouvés pour $\phi = 2$, nous ne les présentons pas ici.

La fonction CRRA permet le calcul du Revenu Equivalent Certain (REC), *i.e.* le revenu qui donne à l'agriculteur la même utilité qu'une distribution donnée de probabilité de revenu. Etant donné que nous faisons l'hypothèse d'une aversion pour le risque, le REC est plus faible que le revenu attendu, *i.e.* la moyenne pondérée de la distribution des revenus. Le REC est calculé à partir de l'utilité attendue EU , comme décrit dans l'équation 6 (avec les mêmes notations que pour les équations précédentes).

$$REC^{st,sc,f} = (W^{(1-\phi)} + (1 - \phi)EU^{st,sc,f})^{\frac{1}{1-\phi}} - W \quad (\text{Eq. 6})$$

3. Résultats et discussion

3.1 Situation de contrôle

La simulation de contrôle (Figure 52) est définie premièrement par une forte prédominance de la variété HKP (~82%) par rapport à Somno (~18%): Bezançon *et al.* (2009) donnent des résultats similaires sur la même zone et avec des données observées *in situ*. 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 semblent assez proches de ce qui est observé dans les dix villages pour lesquels nous avons des données, comme le montre la Figure 52. Les barres grisées 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%). De plus, le taux observé d'utilisation des fertilisants est proche de celui issu de la simulation, même s'il est légèrement plus élevé que pour le scénario de contrôle (5% vs 0%).

D'autre part, la Figure 53 montre que le Revenu Equivalent Certain (REC) associé à la situation de contrôle dépend clairement du type d'année et est ainsi 32% plus élevé pendant les années humides que pendant les années sèches. Ceci est principalement dû au moindre stress hydrique en année humide. Sivakumar (1992) souligne à ce propos que la fréquence des sécheresses diminue lorsque le cumul pluviométrique saisonnier augmente. Etant donné que les rendements du mil sont influencés négativement par les période sèches durant certaines phases critiques (Winkel *et al.* (1997)), cela peut aussi expliquer pourquoi le revenu est plus bas en mauvaise année. De plus, les années humides qui sont aussi fréquemment plus longues permettent un bien meilleur rendement des 18% de somno. Ces arguments montrent également que prédire le cumul saisonnier de pluie a

un intérêt potentiel pour les agriculteurs. Nous étudions de ce fait dans la section suivante comment ceux-ci réagissent à une telle prévision.

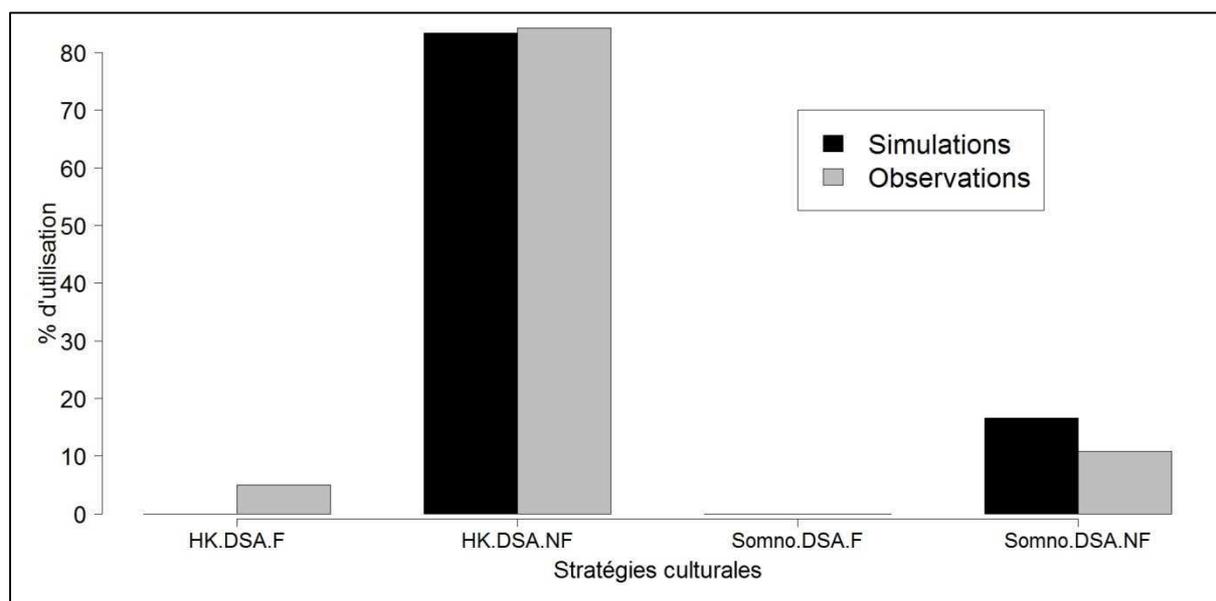


Figure 52: comparaison des taux d'utilisation de chaque itinéraire culturel selon la simulation de contrôle et selon les données observées (2004/2007)

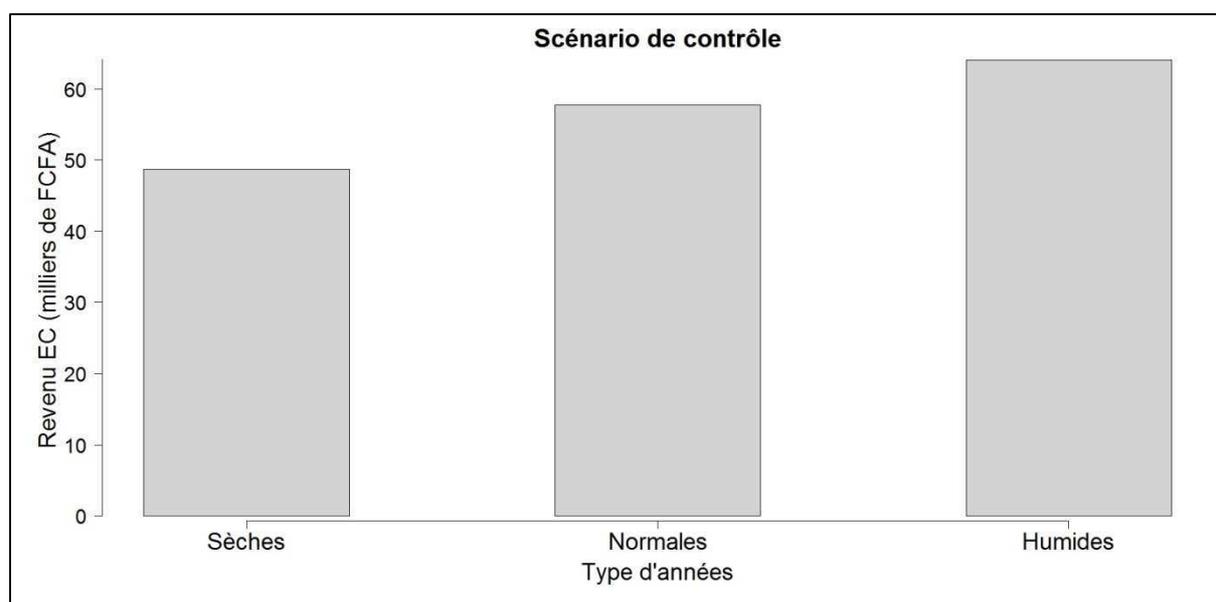


Figure 53: revenu équivalent certain moyen pour la situation de contrôle, selon le type d'année

3.2 Stratégie d'adaptation en fonction du type de prévision

Les stratégies culturelles choisies en réaction aux différents scénarii de prévision (Figure 54 et Figure 55) soulèvent quatre remarques principales.

Premièrement, le cultivar souna III n'est jamais utilisé. Cela est dû principalement au critère de dégradation (coefficient de correction) qui a un important effet négatif sur ses rendements. En effet, comme cette variété a un cycle court, elle arrive fréquemment à maturité trop tôt dans la saison. Les rendements de souna et son taux d'utilisation ne sont pas meilleurs avec la date de semis fondée sur l'offset (DSOF). En effet, si un semis DSOF résout bien le problème en fin de cycle, le semis

est alors trop tardif, ce qui baisse également les rendements. D'autres stratégies culturales sont alors plus efficaces (e.g. HKP, somno). Vaksman et Traoré (1994) arrivent à des conclusions similaires pour la variété souna sur la région de Bankass au Mali. Cela ne signifie pas que ce cultivar est inutile mais plutôt que dans cette région et avec ce type de prévision, ce n'est pas le plus performant. Pour améliorer l'utilisation de souna III, des prévisions de la longueur de la saison pourraient être utiles: si les agriculteurs savent que la saison à venir va être courte, ils peuvent semer souna, comme ils ne courent pas le risque d'avoir des pertes de rendement à cause d'excès d'humidité en fin de cycle.

Deuxièmement, la prévision parfaite (Pft) est utilisée pour sélectionner une stratégie culturale principale pour chaque type d'année: (HK; DSA; NFert) en années sèches, (HK; DSA) en années normales, et (Somno, DSA) en années humides. Somno n'est pas utilisée en années sèches car la saison y est en moyenne 10 jours plus courte qu'en années humides. De ce fait, pendant les années sèches et avec la DSA, la date de récolte de ce cultivar est fréquemment trop tardive et les rendements sont faibles à cause de sécheresses pendant les phases sensibles. La plus grande utilisation d'engrais durant les années humides s'explique par son inefficacité en années sèches. En effet, selon Affholder (1995), la fertilisation peut créer une demande accrue en eau et ainsi dépasser le volume d'eau maximum que le sol peut fournir. Ainsi, en années sèches, la fertilisation peut avoir un impact nul ou même négatif en termes de rendement, et donc négatif en termes de revenu. Il faut souligner que le taux d'utilisation des engrais est le même en années normales et humides (30%) alors qu'on aurait pu penser qu'il allait augmenter entre ces deux catégories. Cela est en fait dû aux prix des engrais qui sont 44% plus élevés en année humide (mais cette élévation du prix ne semble pas due au fait que la pluviométrie soit plus abondante). Ainsi, même si l'utilisation d'engrais a, comme on l'a vu, un effet positif sur les rendements en année pluvieuse, leur prix élevé atténue grandement cet effet.

Troisièmement, les stratégies culturales utilisées avec la prévision imparfaite (Impft) sont moins risquées qu'avec le scénario Pft. En effet, il n'y a par exemple dans les années effectivement humides que trois années qui sont prévues comme tel (voir p. 103): ainsi, le groupe nommé "humides" sur le graphique contient des prévisions plus hétérogènes qu'avec la prévision parfaite. Cela explique pourquoi les agriculteurs utilisent dans le scénario Impft moins d'engrais (un choix risqué) qu'avec Pft et plus la stratégie HK/DSA, qui est la pratique traditionnelle et robuste aux aléas.

Quatrièmement, pour le scénario Pft++, la date de semis fondée sur l'offset (DSOF) est largement utilisée pour tous les types d'années. Pendant les années sèches et normales, cette date de semis est combinée principalement avec HK (sans fertilisation) et en années humides avec somno. Comme avec le scénario Pft et pour les mêmes raisons, somno est utilisée uniquement en année humide. DSON est uniquement utilisée en années normales (~10%), et aurait pu être remplacé par DSOF sans perdre beaucoup. DSON n'est pas beaucoup utilisé car, généralement, DSOF donne de meilleurs résultats en évitant les pertes à la récolte. Cependant, cela ne veut pas dire que DSON est inutile mais plutôt que dans ce cas, DSOF est préférable.

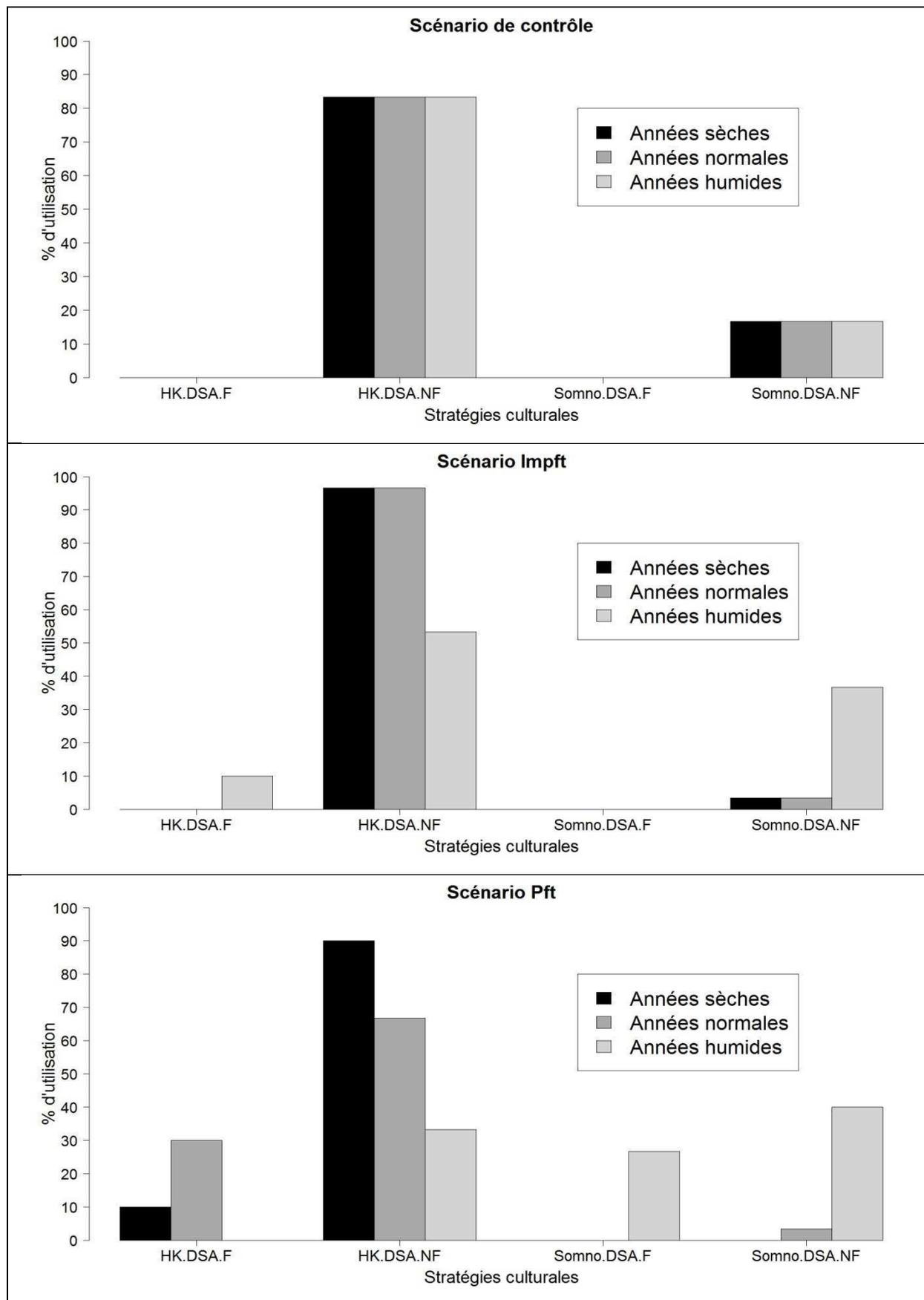


Figure 54: taux d'utilisation (ordonnées, en %) de chaque itinéraire culturel en fonction du type d'années pour le scénario de contrôle (haut), Impft (milieu) et Pft (bas)

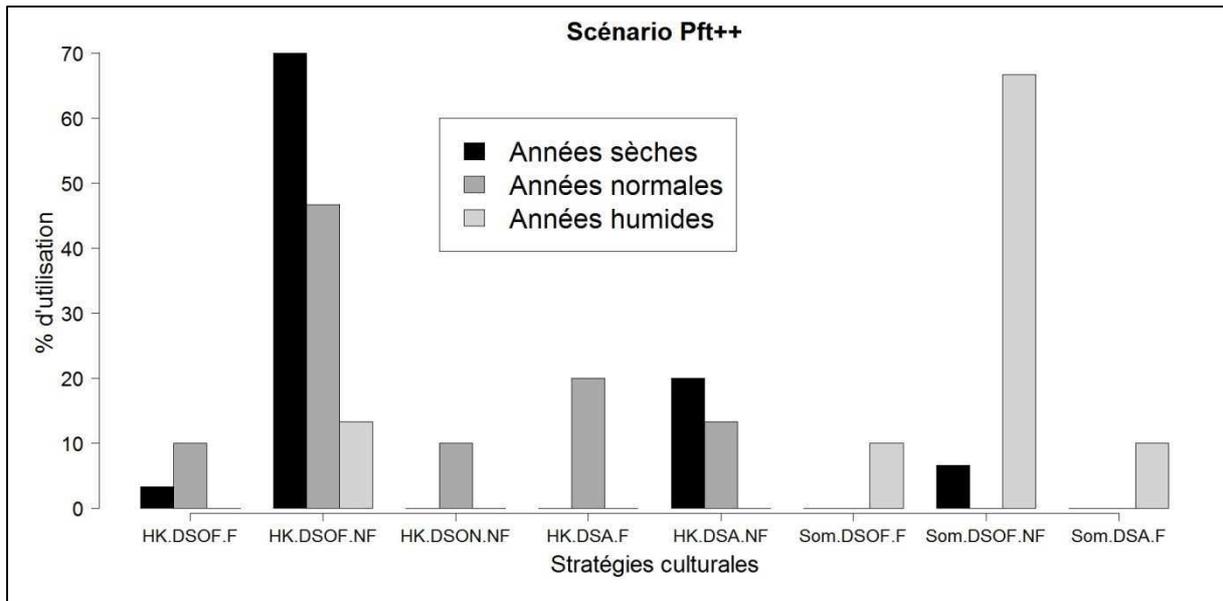


Figure 55: taux d'utilisation (ordonnées, en %) de chaque itinéraire culturel en fonction du type d'années pour le scénario Pft++

3.3 Revenu en fonction du type de prévision

Comme pour la situation de contrôle, nous traduisons dans cette section chaque modification de stratégie culturelle en termes de revenu. Tous les scénarii augmentent le revenu équivalent certain moyen (Figure 56) mais pas avec la même amplitude: Pft++ est le plus bénéfique avec +34% (toutes années confondues). Ce résultat est logique puisque les exploitants disposent de plus d'informations et de plus de stratégies d'adaptation potentielles. Notons que l'augmentation de REC pour Impft (+6.9%) montre qu'une telle prévision, même si elle est imprécise, peut avoir un impact positif pour les cultivateurs de mil. L'augmentation de REC pour le scénario Pft (+11%) n'est de pas radicalement différente de Impft.

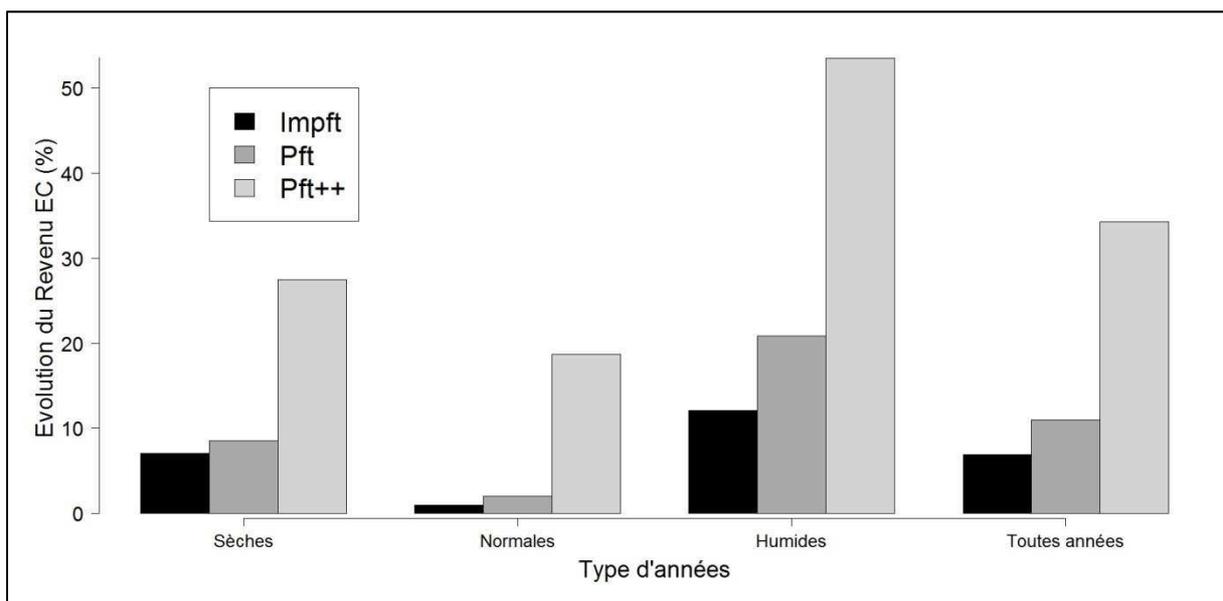


Figure 56: évolution du revenu équivalent certain par rapport à la situation de contrôle, selon le type d'années et le type de prévision considéré

Les trois scénarii considérés ont tous une évolution de REC nettement plus importante en année humide (par exemple pour Pft++: +53.5 %, vs. +27.5% en années sèches et +18.5% en années normales). Cette forte augmentation durant les années humides résulte de l'effet positif des engrais et de la variété somno. Les itinéraires culturaux des années sèches et normales se rapprochent en revanche plus de ceux de la stratégie de contrôle, ce qui explique une augmentation moindre du REC. Cela est particulièrement vrai pour les années normales, où l'intérêt des prévisions est relativement faible. En effet, le groupe "années normales" regroupe des années au profil assez différents: la situation se rapproche alors d'une configuration sans prévision où des types de saisons contrastés peuvent survenir. Cela explique le peu de changement dans les pratiques culturales. 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 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%). Ces valeurs sont légèrement supérieures aux nôtres du fait d'une meilleure corrélation entre les indices climatiques employés et la pluie dans cette région.

Notons d'autre part que, bien qu'inférieure à l'augmentation en années humides, la variation de REC en années sèches pour le scénario Impft n'est pas négligeable (+7.1%), ce qui est assez remarquable puisqu'augmenter les revenus les plus bas est un défi important. De telles augmentations se retrouvent pour toutes les années à faible revenu (Figure 57), à l'exception de la pire, 1997, où Impft donne un revenu légèrement plus bas que Ctrl, tout comme Pft. Pour trois autres années, avec des revenus plus élevés cette fois (2003, 2004, 2007), Pft donne de plus mauvais résultats que Ctrl. Chaque fois, cela est principalement dû à une ou deux stations. Des détails concernant ces années sont donnés dans le Tableau 15. On peut remarquer que toutes les stations concernées sont situées dans la partie sud de cette zone.

L'année 2002 est également intéressante à étudier, étant donné que Pft++ donne de bien meilleurs résultats que pour les autres années. Cette augmentation très importante du revenu, comparée aux autres scénarii, est principalement due aux stations où somno est utilisée sur toutes les parcelles (avec Pft++). En effet, la saison 2002 est en moyenne sept jours plus longue que les autres années du groupe "humide" (Figure 58). Pour certaines stations semant uniquement somno, la saison est même plus de 20 jours plus longue. Cela crée des conditions optimales pour ce cultivar: les gains avec Pft++ sont de ce fait plus élevés qu'avec Pft qui utilise moins de somno.

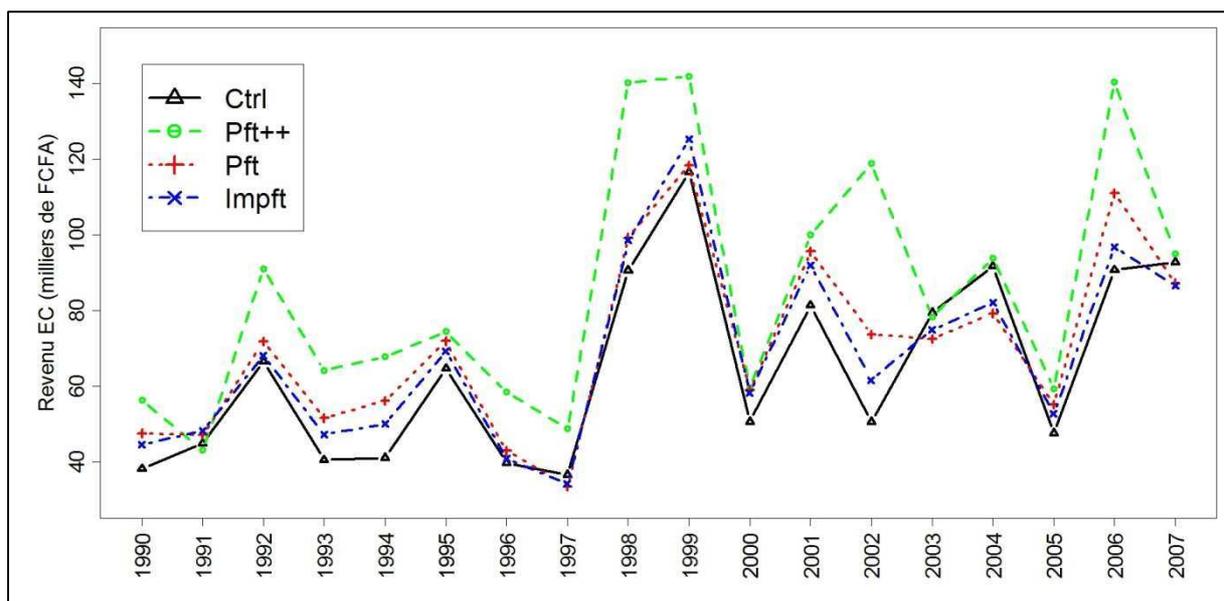


Figure 57: évolution du revenu, année par année , moyenné sur les 10 villages et pour chaque prévision considérée

Année (type observé)	Stations	Explications
1997 (sèche)	Tanabéri	Les engrais utilisés avec le scénario "Pft" sont inutiles
2003 (normale)	Karé	2003 est spécialement humide à Karé, c'est pourquoi semer somno comme dans le contrôle donne de meilleurs résultats que semer seulement HKP (Pft)
2004 (sèche)	Karé et Tanabéri	Pour Karé: mêmes raisons qu'en 2003 Pour Tanabéri: mêmes raisons que Tanabéri en 1997+ Karé en 2003
2007 (normale)	Tanabéri et Torodi	Mêmes raisons que Karé en 2003

Tableau 15: pourquoi les années 1997, 2003, 2004 et 2007 ont des revenus plus faibles avec Pft qu'avec Ctrl

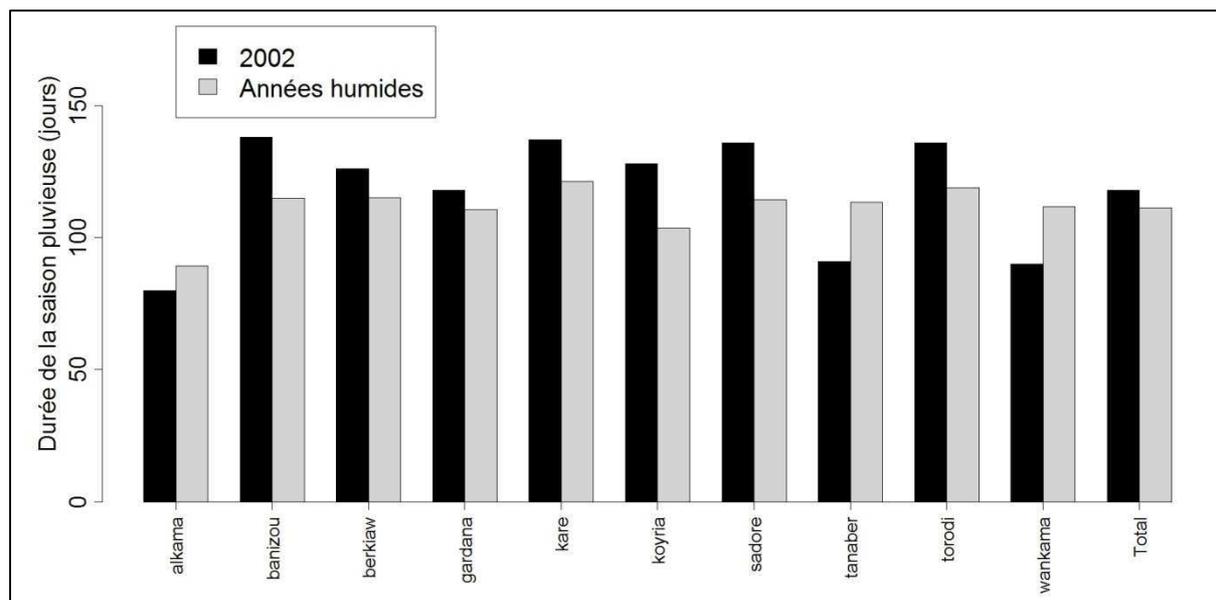


Figure 58: durée de la saison pluvieuse pour 2002 et les années humides (moyenne)

4. Conclusions

A partir des hypothèses décrites dans ce chapitre, nous avons quantifié la valeur de différents types de prévisions saisonnières pour des cultivateurs de mil du Niger, en considérant les années 1990/2007. Nous avons ainsi évalué trois scénarii différents de prévision du cumul pluviométrique saisonnier: une prévision de la catégorie de pluie de la saison à venir (humide, normale ou sèche) avec une précision proche de la réalité (notation "Impft"), une prévision sans erreur de cette même catégorie ("Pft") et un troisième scénario ("Pft++") fournissant la même information que Pft, avec en plus la date de début (onset) et de fin (offset) de la saison.

En réponse aux prévisions, on autorise les agriculteurs à choisir entre trois variétés contrastées de mil, deux niveaux de fertilisation et trois dates de semis (pour certains scénarii de prévision). La meilleure stratégie d'adaptation est définie pour chaque type d'année en tenant compte de l'aversion au risque des agriculteurs sahéliens grâce à une fonction d'utilité CRRA.

Les résultats montrent que même une prévision du cumul saisonnier imparfaite fondée sur une relation statistique assez simple entre la pluie et des prédicteurs climatiques a un effet positif et permet d'augmenter le revenu équivalent certain (REC, +6.9%). Quand la prévision est plus précise (scénario Pft), la variation de REC connaît également une amélioration (+11%), qui est maximum pour le scénario Pft++ où plus de stratégies d'adaptation sont disponibles (+34%). Ce scénario Pft++ donne en effet des informations supplémentaires sur les dates de démarrage et de fin de la saison, ce qui permet d'utiliser des dates de semis différentes.

Nous montrons aussi dans ce chapitre que l'intérêt des prévisions dépend du type d'année considéré: le REC est par exemple plus élevé en année humide qu'en année sèche (pour Pft: +21% en année humide vs +8.5% en année sèche). L'augmentation du REC n'en reste pas moins intéressante pendant les années sèches: par exemple, le scénario Impft permet une augmentation significative du REC en année sèche (+7.1%), tout comme Pft (+8.5%). Cela montre que ce type de prévision peut améliorer la situation durant les années les plus critiques, même lorsqu'elle est imprécise. C'est cependant en année "normale" que la différence avec le scénario de contrôle est la plus faible (+2.1 % pour Pft). En effet, comme le groupe "année normale" est assez hétérogène au niveau climatique (des années au profil assez contrasté), il est plus difficile de trouver une stratégie efficace: ainsi, les pratiques culturales en année normale sont assez proches d'une situation sans prévision.

Les différences d'augmentation du REC en 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, plus longues, permettent notamment l'utilisation de la variété somno (cycle plus long) et des fertilisants, qui améliorent les rendements. Ces ajustements ne sont pas possibles, ou moins efficaces en année sèche. Nous trouvons de plus que la variété souna III ne semble pas pertinente ici, quels que soient les scénarii de prévisions envisagés. En effet, souna III a un cycle trop court par rapport à la durée de la saison: ce cultivar arrive donc souvent à maturité trop tôt dans la saison et subit alors des pertes dues aux excès d'eau.

Finalement, un système de prévision saisonnière a un impact non négligeable sur le revenu des agriculteurs, même lorsqu'on tient compte de l'imprécision de la prévision. Les trois scénarii étudiés montrent cependant que la valeur ajoutée pourrait être plus importante si la précision de la prévision était améliorée mais surtout si d'autres informations comme la date de début et de fin de la saison étaient disponibles. Selon ces résultats, il semble donc que pour améliorer l'utilité des prévisions saisonnières il soit plus bénéfique de travailler sur la construction de nouveaux indices renseignant notamment sur le début et la fin de la saison que d'améliorer la précision d'une prévision classique du cumul saisonnier. Ces résultats sont en accord avec les demandes des agriculteurs et semblent ainsi robustes. Il faut néanmoins souligner qu'ils ne sont valables que pour la région du degré carré autour de Niamey, semi-aride. Dans un environnement plus humide avec plus de possibilités d'adaptation, la valeur des prévisions saisonnières serait probablement plus élevée. Les agriculteurs pourraient en effet choisir parmi plusieurs cultures et inclure potentiellement des cultures plus productives mais également plus sensibles à la variabilité interannuelle comme le maïs (Sultan *et al.* (2010)). De plus, le rôle de l'élevage (notamment comme système d'épargne) doit être inclus dans le futur de manière à avoir une évaluation plus globale. Enfin, nous rappelons que ces résultats ne sont valables que sous différentes hypothèses fortes comme le fait que tous les agriculteurs suivent la prévision.

Chapitre 5: Evaluation par ateliers participatifs de l'impact sur les choix cultureux et les rendements des prévisions saisonnières et décadaires dans deux villages du bassin arachidier sénégalais.

Communications relatives à ce chapitre:

- http://www.dailymotion.com/video/xksbwy_ateliers-participatifs-sur-les-previsions-saisonnierees-au-senegal-projet-escape-juin-2011_tech
- Poster destiné au retour d'expérience sur les ateliers (Annexes, page 189)

Résumé

Nous étudions dans ce chapitre, grâce à des ateliers participatifs dans deux villages sénégalais, les changements cultureux induits par l'utilisation des prévisions saisonnières et décadaires, et l'impact sur les rendements. Grâce à un support de restitution papier, les participants aux ateliers peuvent retranscrire leurs choix cultureux à l'échelle décadaire pour plusieurs années sélectionnées auparavant. Ils font tout d'abord cela sans recevoir de prévision, c'est la situation de contrôle (situation actuelle). Ils rejouent par la suite ces mêmes années avec deux informations, sur le cumul pluviométrique saisonnier et le cumul décadaire à venir. En comparant leurs pratiques culturelles avec et sans prévision, on peut ainsi en déduire les changements induits par les prévisions sur les pratiques culturelles et les rendements. Les résultats et les discussions montrent que les participants, mêmes s'ils ont déjà des moyens locaux de prévisions font un bon accueil à ces nouvelles informations, surtout les prévisions décadaires. Celles-ci permettent en effet d'optimiser les pratiques culturelles comme le semis, la récolte, le sarclobinage dans différentes situations: par exemple, pour le maïs et l'arachide, éviter une sécheresse juste après le semis. Les prévisions saisonnières sont quant à elles utilisées plus marginalement, et surtout dans le village ayant accès à plus de cultures/variétés grâce à une plus forte pluviométrie et à la présence d'une coopérative semencière. Les agriculteurs utilisent ces prévisions saisonnières pour choisir leur variété d'arachide, les types de cultures (niébé si l'année est prévue sèche) et parfois pour décider de l'utilisation d'intrants (engrais si la saison est prévue humide). L'impact de ces changements cultureux sur les rendements est par contre plus complexe à évaluer. Il est évalué avec l'aide d'un expert et montre que les prévisions ont certes un effet nul dans 62% des cas, mais qu'il est positif dans 31%. Ces résultats dépendent cependant des villages étudiés.

1. Introduction

Le chapitre précédent a montré via une étude *ex ante* comment les paysans sahéliens pouvaient potentiellement changer leurs pratiques culturelles en réaction aux prévisions saisonnières et ainsi accroître leurs revenus. Cependant, on a vu que ces calculs s'accompagnaient d'hypothèses sur le comportement des agriculteurs qu'il est difficile de prévoir. Par exemple, le scepticisme vis-à-vis de la prévision n'a pas été pris en compte, tout comme les phénomènes de groupe, puisqu'on modélisait le fonctionnement d'une seule exploitation-type par village. Il nous paraissait donc pertinent d'étudier et de quantifier en détail les réactions réelles (et non plus simulées par un modèle) d'agriculteurs face à des prévisions, un point qui demande encore des recherches pour comprendre par quel processus l'information climatique a un impact sur les rendements (Roncoli (2006)). Ainsi, si le chapitre précédent visait à décrire une utilisation et une valeur potentielles de la prévision, celui-ci a pour but d'observer les réactions le plus en détail possible, dans une situation plus proche de la réalité et finalement d'évaluer qualitativement les gains ou pertes engendrés.

Pour cela, on peut potentiellement élaborer une approche *ex post*. Comme souligné par Msangi *et al.* (2006), les études *ex post* ayant pour but d'évaluer la valeur d'une information climatique sont en nombre relativement limité. En effet, ce type de travail nécessite, pour avoir des résultats solides, plusieurs années d'essais en champs, ce qui mobilise de gros moyens humains et financiers. De plus, si les études *ex post* déjà réalisées en Afrique (*e.g.* Patt *et al.* (2005), Hellmuth *et al.* (2007), Konte (2007)) quantifient l'impact sur les rendements, on ne trouve en revanche pas souvent de description précise des changements cultureux (variétés, date de semis, fertilisation, type de sol), notamment car un suivi détaillé (pour le sarclage, l'épandage d'engrais), par exemple tous les dix jours, est complexe à mettre en place sur plusieurs années. Pour ces raisons, on ne réalise pas ici une analyse *ex post* fondée sur des essais en champs.

Pour pouvoir tout de même observer les réactions des agriculteurs, nous avons donc utilisé un concept particulier "d'ateliers participatifs". Nous employons ici des guillemets car si notre définition "d'ateliers participatifs" est proche de celle qu'on peut trouver notamment chez Roncoli (2006), notre but n'est cependant pas de changer les comportements ni de faire adopter un outil - les prévisions en l'occurrence - mais plutôt d'étudier les changements potentiels qu'une prévision existante pourrait induire. Il est cependant clair que de tels ateliers peuvent engendrer, par la suite, des changements de pratiques culturelles, mais ce n'est pas ici le but final, à la différence des ateliers mis en place par les agences météorologiques nationales (voir par exemple ceux menés par l'Agence Nationale de la Météorologie du Sénégal (ANAMS)²³). Ces ateliers visant à expliquer et diffuser les prévisions sont nombreux: Hansen *et al.* (2011) soulignent ainsi que sur dix-sept pays d'Afrique diffusant les prévisions saisonnières, huit utilisent des ateliers. Cependant, il y en a moins dont le but est d'analyser les changements de pratiques culturelles des participants et l'impact sur les rendements. Si certains types d'ateliers (des études *ex ante*) s'intéressent quant à eux aux changements de pratiques culturelles (voir Tableau 12, page 100) notamment sous forme d'enquêtes, ils ne détaillent en général pas l'impact sur la production. Ils sont de plus peu fréquents en Afrique de l'Ouest, ne comportent pas toujours de précisions sur les variétés employées et n'utilisent pas d'années réelles. Par exemple, Ingram *et al.* (2002) ne décrivent les changements que dans des cas généraux car cela n'est qu'un des objectifs de leurs ateliers. Enfin, si certaines études qui mélangent modélisation et ateliers (Ziervogel *et al.* (2005)) détaillent relativement bien l'impact des prévisions sur les pratiques et les rendements, ils ne tiennent pas compte des prévisions décennales, pourtant disponibles dans certains pays d'Afrique.

Les ateliers mis en place dans ce chapitre ont ainsi pour but de combiner sur une région où les informations de ce type sont rares les différents aspects évoqués précédemment: renseigner l'impact sur les rendements et les changements de pratiques culturelles avec précision, en réaction à

²³ voir par exemple <http://ccaafs.cgiar.org/blog/putting-climate-forecasts-farmers-hands>

des prévisions décadaires et saisonnières existantes et pour des années réelles. Pour cela, plusieurs participants sont invités à reproduire sur un support de restitution et à un pas de temps de dix jours les changements de pratiques culturelles qu'ils auraient effectués si on leur donnait des prévisions saisonnières et décadaires. On peut ainsi, et grâce aux discussions avec les participants, étudier plusieurs années à un pas de temps fin et comprendre (i) les changements de pratiques culturelles en détail, (ii) leur impact sur les rendements et (iii) l'acceptation de la prévision scientifique et notamment les réactions face à son imprécision et ses erreurs. Il faut cependant garder en mémoire que les résultats présentés ici n'ont pas la prétention d'être représentatifs des changements de pratiques en Afrique de l'Ouest ni même au Sénégal. Ils illustrent seulement le comportement et les réactions de certains agriculteurs.

En pratique, nous avons choisi deux localités du bassin arachidier du Sénégal car les possibilités d'adaptation y sont plus nombreuses qu'au Niger, ce qui laisse plus de marge de manœuvre aux agriculteurs (plusieurs cultures, variétés, mécanisation...). Les deux villages sont contrastés climatiquement afin d'étudier une différence potentielle dans la réponse aux prévisions.

2. Zone et méthodologie

2.1 Sites et données

2.1.1 Sites

Les sites choisis se trouvent dans le bassin arachidier du Sénégal. Si leur distance géographique n'est pas très importante (une centaine de kilomètres, Figure 59), leurs caractéristiques agro-climatiques et économiques ne sont pas identiques. L'étude de situations contrastées permet en effet d'étudier les différences de réactions vis-à-vis de la prévision.

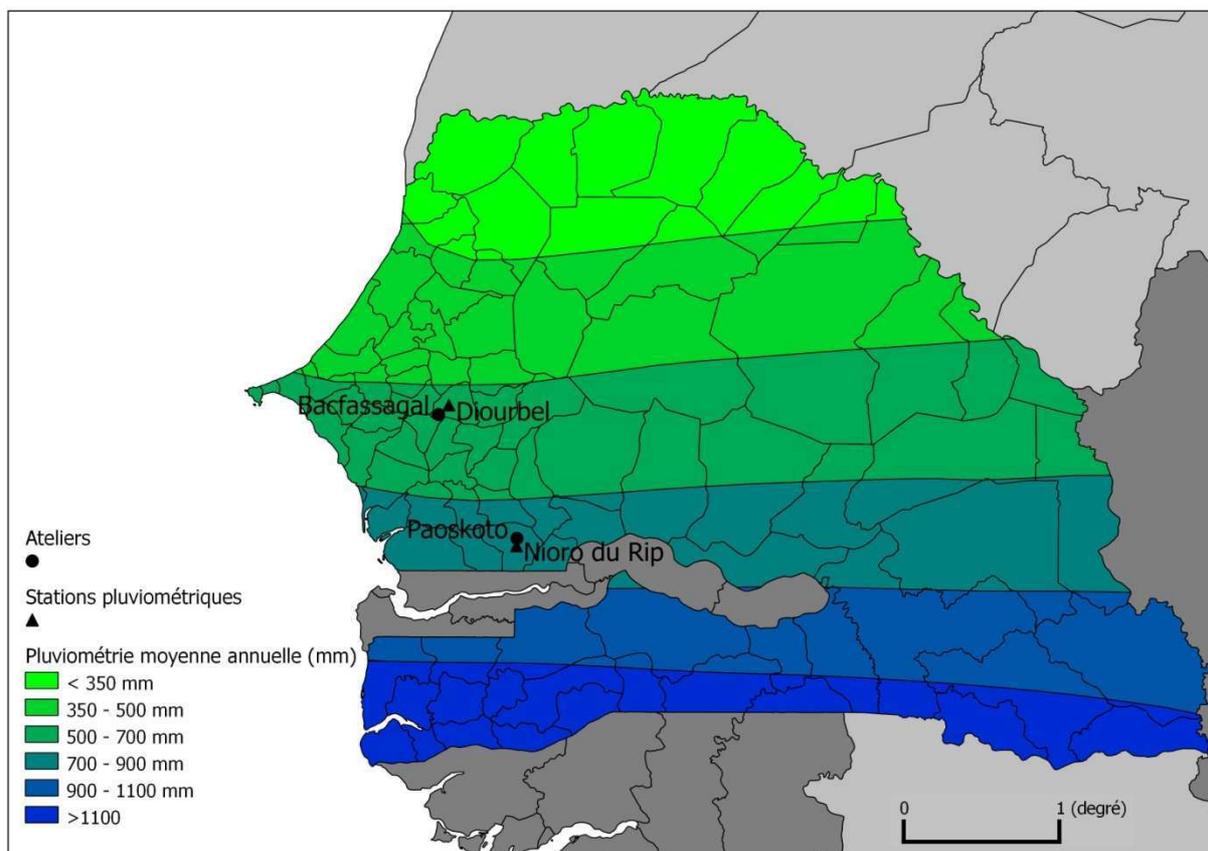


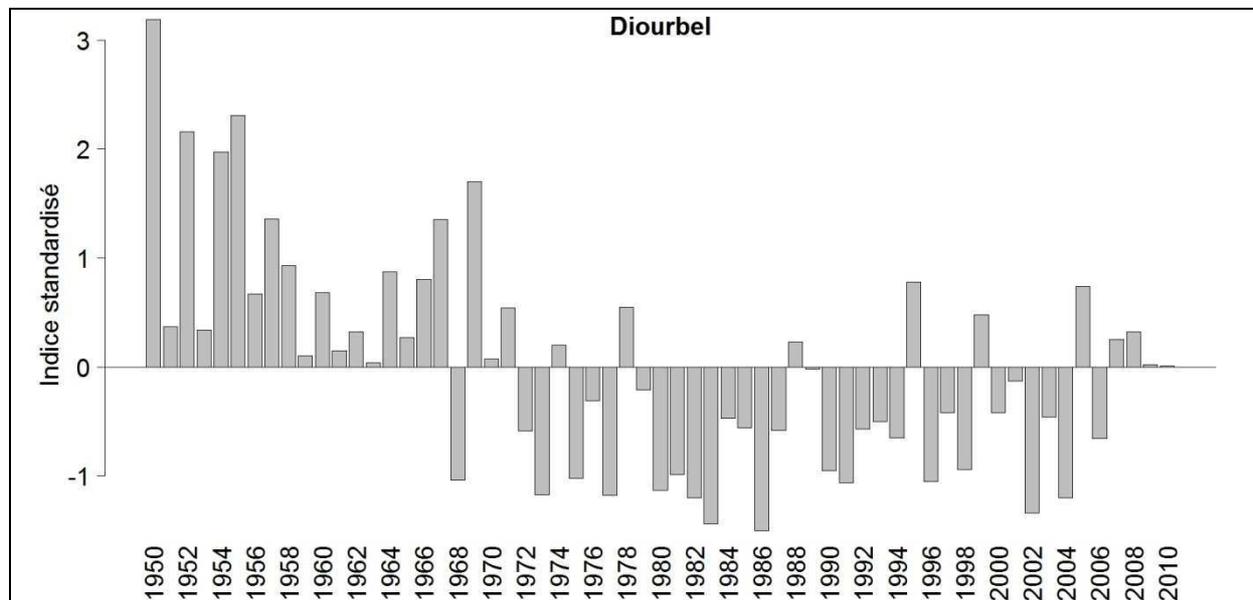
Figure 59: localisation des villages des ateliers avec la station pluviométrique de référence, données de pluie issues du CRU TS 3.1 (1961/1990)

La première localité, Paoskoto, est située près de la ville de Nioro du Rip et la seconde, Bacfassagal, près de Diourbel. Nous utilisons par la suite les données de pluie de Nioro et Diourbel comme approximation de la pluie sur les sites d'étude. Paoskoto, qui est situé plus au Sud connaît une pluviométrie annuelle plus importante que Bacfassagal (735 mm et 470 mm, respectivement, en moyenne sur 1970/2010 et 716 mm et 507 mm sur 1961/1990) ce qui permet d'avoir des cultures plus diversifiées. Si les deux villages ont comme cultures principales le mil et l'arachide, une première mission en avril 2011 nous a montré qu'il y a également à Paoskoto une part importante de maïs, quelques exploitants qui commencent à semer du riz pluvial²⁴ et des variétés d'arachide plus diversifiées qu'à Bacfassagal.

L'existence de nombreuses variétés d'arachide à Paoskoto s'explique par la présence d'une coopérative agricole semencière (Coopérative des producteurs de semences d'arachide de Paoskoto) créée en 2007 et regroupant 410 producteurs. Celle-ci distribue des semences certifiées d'arachide (au moins pour deux hectares) et débute avec les semences de maïs. Les agriculteurs de Paoskoto disposent ainsi d'un meilleur accès aux semences. Il semble également que les exploitants de Bacfassagal aient un accès plus limité aux engrais et au matériel agricole (e.g. charrue, houe sine²⁵). Enfin, les petits ruminants et bovins sont moins nombreux à Bacfassagal. Paoskoto et Bacfassagal apparaissent donc comme deux villages relativement contrastés vis-à-vis du climat et de leurs systèmes agricoles, les exploitants de Paoskoto ayant des options plus diverses à leur disposition.

D'autre part, les deux localités ont connu comme toute l'Afrique de l'Ouest un fort déficit pluviométrique dans les années 70/80 (Figure 60) avec des années de graves crises comme 1983/84. Une légère reprise des pluies est notable (visuellement) depuis 2007 pour les deux stations, spécialement pour Nioro qui a connu une année 2010 très pluvieuse. Bien que la méthode de segmentation de Hubert (Hubert *et al.* (1989)) permettant de détecter des ruptures dans les séries météorologiques n'indiquent pas de rupture récente pour les deux stations, cette légère reprise nous a été confirmée par les agriculteurs des deux localités.

Notons d'autre part que si on a vu au chapitre 2 (page 40) qu'il n'y avait pas de reprise de la pluviométrie à l'ouest de l'Afrique de l'Ouest et donc au Sénégal, ces résultats étaient calculés avec des données s'arrêtant en 2007.



²⁴ le riz pluvial est un type de riz non-irrigué.

²⁵ la houe sine est un matériel agricole léger (en comparaison à la charrue) à traction animale permettant de retourner le sol

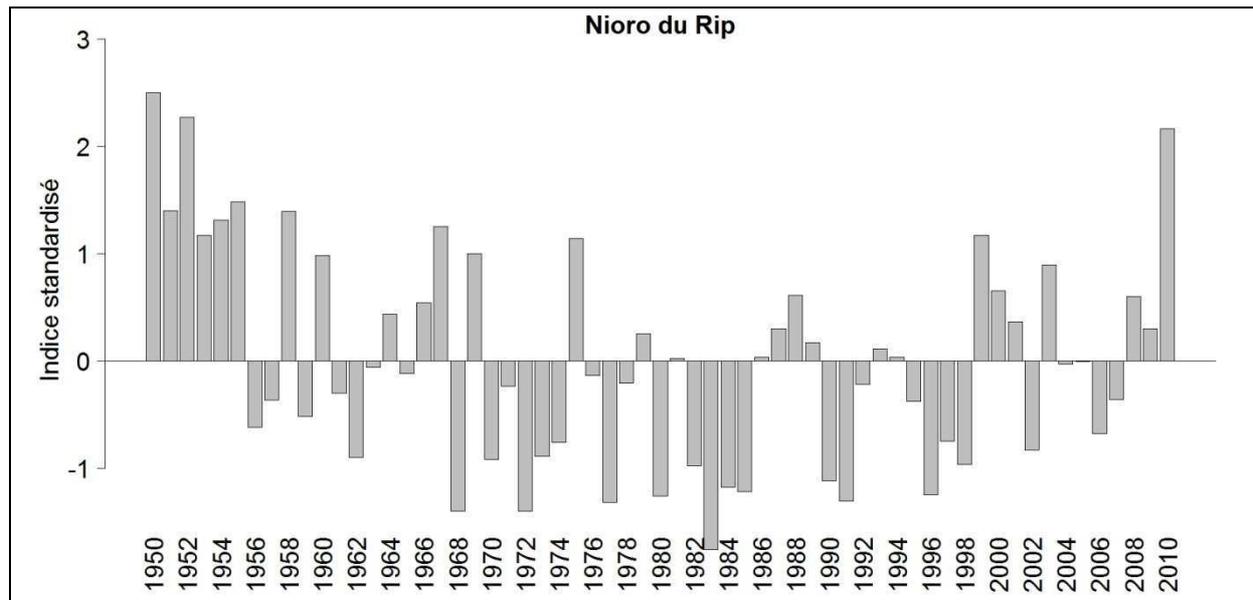


Figure 60: pluviométrie annuelle (anomalie standardisée) sur la période 1950/2010 pour les deux stations pluviométriques, Diourbel (Bacfassagal) et Niuro du Rip (Paoskoto)

2.1.2 Données utilisées

Nous utilisons dans ce chapitre trois jeux de données principaux qui sont décrits dans le chapitre 1:

- Les données journalières de pluie pour la période 1950/2010 à Diourbel et Niuro du Rip.
- Les données du multi-modèles de ENSEMBLES pour les prévisions saisonnières (1960/2005)
- Les données de prévision de la pluie à moyen terme de l'ECMWF pour les prévisions décadaires (1985/2000).

2.2 Méthodologie

2.2.1 Déroulement des ateliers tels qu'ils étaient prévus avant d'arriver

- Déroulement global

Ces ateliers se fondent sur l'approche ComMod (Companion Modelling approach, <http://www.commod.org/>), dans le sens où ils constituent un va-et-vient entre la théorie scientifique et la pratique locale et où ils prennent en compte et essaient de comprendre des points de vue contradictoires, voire même opposés, sur les prévisions saisonnières. L'approche ComMod a été employée à de nombreuses reprises au Sénégal pour des questions d'usage des sols notamment (*e.g.* D'Aquino *et al.* (2003)), mais avec un fort accent sur la dimension spatiale qui n'est pas présent ici. Nos ateliers ont quant à eux pour but d'étudier l'impact de deux types de prévisions sur les pratiques culturelles des agriculteurs, et d'évaluer l'influence sur leur production. Les exploitants sont amenés à préciser leurs choix cultureux tout au long de l'hivernage, à un pas de temps décadaire, et sur plusieurs années différentes. Pour cela, les ateliers (Photo 1) ont été initialement prévus pour se dérouler en trois grandes phases, qui se déroulent au total sur deux jours:

- Le jeu à proprement parler (lui-même composé de deux tours): c'est la phase principale durant laquelle on recueille les résultats quantitatifs sur les supports de restitution.
- La discussion générale sur les prévisions durant laquelle les participants peuvent s'exprimer librement sur leurs propres moyens de prévision, leur avis sur le jeu, expliquer leur choix durant le jeu.

- Les questionnaires individuels qui ont pour but de recueillir des informations pouvant expliquer le comportement des joueurs vis-à-vis de la prévision durant l'atelier (e.g. âge, connaissance au préalable des prévisions saisonnières, pratiques culturelles)

- Phase de jeu

La phase de jeu est partagée en deux tours distincts. Dans les deux, les participants sont invités à retranscrire sur le papier leurs pratiques culturelles tout au long de l'année, et cela pour douze années, dans chaque tour : il est donc prévu de "jouer" 24 années au total. Cependant, les informations dont les agriculteurs disposent sont différentes durant les deux tours:

- au tour n°1, ils ne disposent que de la pluie qui est effectivement tombée durant la décade, c'est-à-dire ce qu'ils verraient s'ils vivaient vraiment l'année. Ils reçoivent donc tous les dix jours cette information qui leur est présentée oralement et sous forme d'histogramme au tableau. Ce tour n°1 simule la situation actuelle (dite de contrôle) où ils ne disposent pas de prévisions.

- au tour n°2, les participants rejouent -sans en être informés- les mêmes années, avec la même information pluviométrique qu'au tour précédent, mais en y ajoutant une prévision saisonnière et une prévision décadaire. Nous avons décidé de leur donner des prévisions décadaires car (i) des prévisions décadaires sont effectivement préparées par les services de la météorologie nationale, (ii) cela permet de comparer l'efficacité de la prévision saisonnière avec une autre prévision (iii) elles donnent plus de dynamisme à l'atelier en apportant à intervalles restreints de nouvelles informations et (iv) des prévisions à court terme sont également données lors d'analyses *ex post* (Konte (2007); Hellmuth *et al.* (2007)).

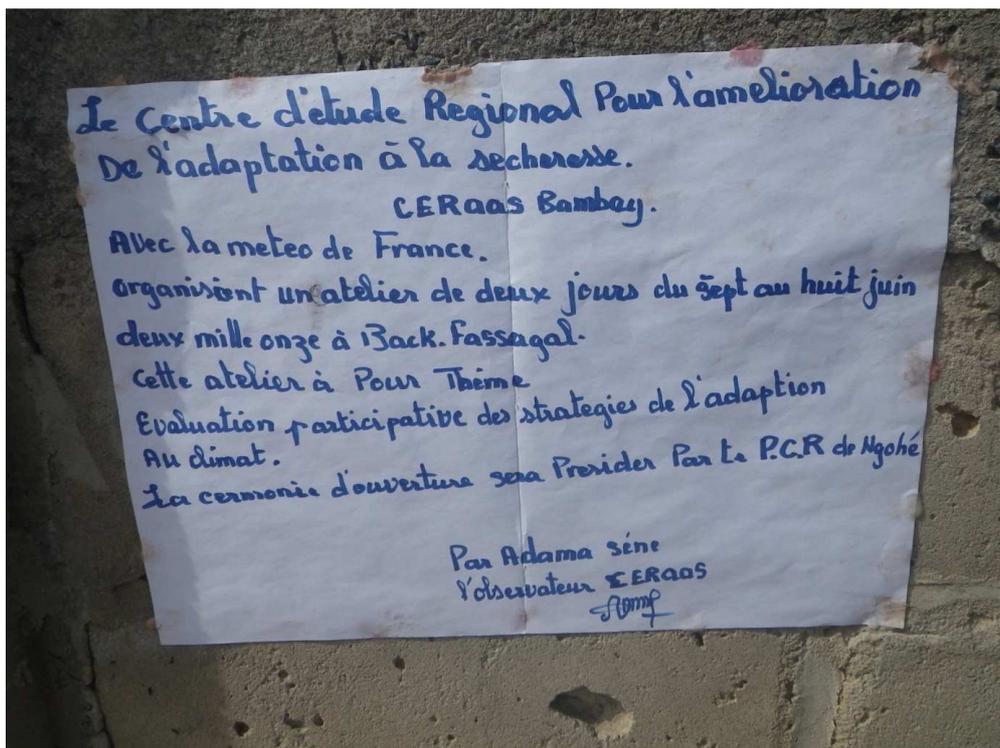


Photo 1: annonce pour le deuxième atelier, à Baccfassagal

La prévision saisonnière est donnée oralement au début de l'année avant même le choix des cultures. Elle concerne la tendance du cumul saisonnier (JJAS) par rapport aux années 1960/2005. Les prévisions décadaires sont données tous les dix jours oralement et sont également inscrites sur le tableau (Photo 2). Elles renseignent sur le cumul pluviométrique décadaire discrétisé en trois classes, qui ont été définies par un expert en agronomie tropicale:

- <10 mm: ce sont les pluies qui ne sont pas efficaces pour l'agriculture.

- [10 : 80mm]: ce sont les pluies effectivement exploitables par l'agriculteur et utiles aux cultures. Ce sont par exemple les pluies qui vont entrainer la levée du mil.

- >80 mm: ce sont les pluies qui présentent un risque potentiel: danger pour la culture, impossibilité d'accéder aux champs...Il paraît pertinent de s'intéresser spécifiquement à ce type de pluie comme elles peuvent avoir un impact significatif sur la production.

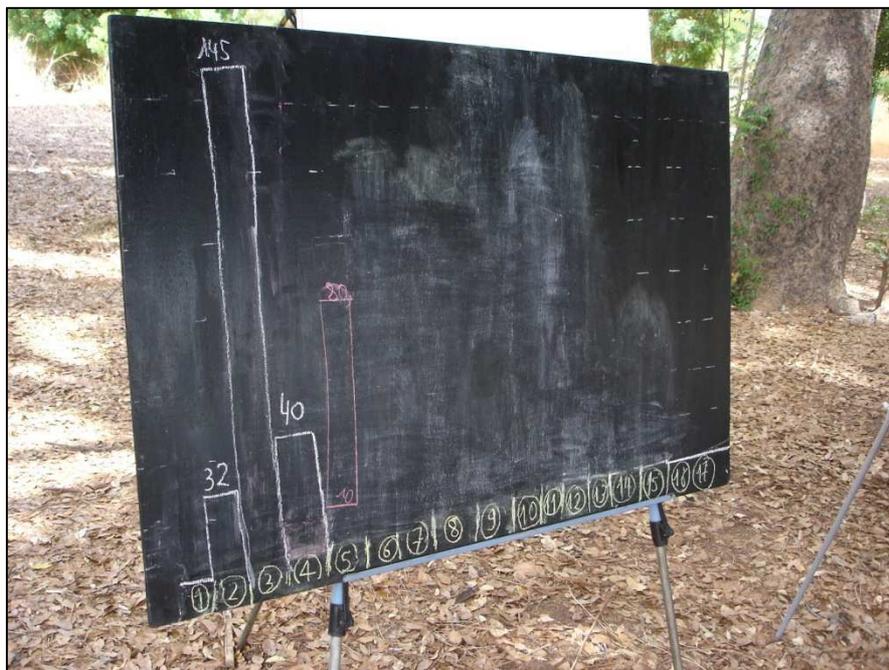


Photo 2: tableau employé lors des ateliers pour afficher la pluie tombée

Afin de pouvoir recueillir les pratiques culturelles chaque année, nous avons élaboré une fiche de jeu (Photo 3, Tableau 16) sous forme de tableau. Les colonnes représentent les décades de l'année (du 20 mai au 10 novembre) et chaque ligne représente un champ. Le champ est caractérisé par une culture, un type de sol (sableux/argilo-sableux, appelés localement dior/deck) et une localisation (brousse/case), à préciser dans la zone grise à chaque début d'année. Ces précisions sont nécessaires car ce sont des paramètres sur lesquels les exploitants peuvent jouer en réaction à la prévision saisonnière (voir par exemple Sultan *et al.* (2010)). Les choix cultureux décadaires se font à l'aide d'un code couleur établi avec les participants, et qui varie selon les deux villages. Nous avons choisi au préalable de représenter les principales actions culturelles: préparation du champ, fumure, labour léger (cheval), labour lourd (bœuf), labour au tracteur, fumure organique, semis, utilisation d'engrais chimique, utilisation de produits chimiques (pesticides), démariage²⁶, sarclobinage²⁷ manuel, sarclobinage avec une houe sine et récolte. Afin de symboliser leurs choix, les participants disposent tous d'une boîte de onze crayons de couleur.

Culture/Cultivar	Situation	Sol	21/31 Mai	1/10 Juin	...	1/10 Nvbre	Evaluation du rendement
Mil /Souna 3	Brousse	Sableux					

Tableau 16: schématisation de la feuille de jeu

²⁶ élimination de certains pieds, au début du cycle

²⁷ compression de "sarclage" et "binage", opérations de travail de la terre visant par exemple à désherber ou à favoriser l'infiltration de l'eau

La colonne à l'extrémité droite de la feuille (Tableau 16) sert à la notation du rendement du champ. Cette notation est faite par l'exploitant lui-même à la fin de l'année. Il peut choisir entre cinq catégories symbolisées par une à cinq étoiles (Tableau 17). Cette notation intervient après un commentaire en groupe de l'année.

Symbole	Signification
*	Année exceptionnellement mauvaise
**	Année mauvaise
***	Année moyenne
****	Année bonne
*****	Année exceptionnellement bonne

Tableau 17: code employé pour la notation des rendements sur les feuilles de jeu



Photo 3: exemple d'une feuille de jeu pendant l'atelier de Paoskoto

- La discussion générale

A la fin de ces deux tours, les agriculteurs sont amenés à discuter librement du jeu, de leur utilisation de la prévision, de leur compréhension, ou de toutes autres thématiques. La discussion peut être dirigée au besoin par les questions suivantes préparées au préalable:

- Qui avait déjà entendu parler de ce type de prévision?
- Est-ce que c'était de la même façon (même format)?
- Quels sont les moyens de prévisions que vous employez d'habitude?
- Est-ce que les informations données vous ont semblé pertinentes? Plus fiables que vos moyens de prévisions?
- Est-ce qu'elle étaient claires? Les catégories étaient-elles bien faites?
- Quelles informations auriez-vous aimées?

- Ceux qui n'ont pas utilisé les informations, pourquoi?
- Est-ce que la précision de l'information est suffisante?
- Laquelle est la plus utile: décadaire ou saisonnière?
- Est-ce que vous pensez que les informations seraient beaucoup plus utiles avec un meilleur accès aux intrants?
- Prévoir une bonne année, est-ce plus important qu'une mauvaise (*i.e.* quand la prévision est-elle le plus utile?)
- Même question pour les prévisions décadaires.
- Quel type d'erreur est le plus problématique?
- Pour la prévision saisonnière, quand faudrait-il la donner dans la saison pour que ce soit utile?

- Les enquêtes individuelles

Ces enquêtes ont pour but de recueillir des informations pouvant expliquer la réaction à la prévision, mais aussi de vérifier en cas de doute une information de la feuille de jeu. Typiquement, si l'exploitant déclare dans l'enquête ne jamais utiliser d'engrais, il ne devrait pas en mettre durant le premier tour de jeu. C'est également le moment où l'on peut recueillir les avis sur les ateliers. Le questionnaire (voir Annexes, page 185) est subdivisé en quatre parties: (i) présentation du participant, (ii) description de l'exploitation, (iii) connaissance des prévisions, (iv) appréciation des ateliers.

2.2.2 Choix des années

Nous avons donc sélectionné pour chacun des villages douze années entre 1960 et 2005. Les 46 années disponibles ont été classées en trois terciles suivant le cumul pluviométrique saisonnier. Quatre années ont alors été choisies dans chacune des trois classes ("humide", "normale" et "sèche"). Le choix dans chaque catégorie a été effectué en s'intéressant à certaines particularités de la saison qui ont un impact sur le rendement des cultures (Tableau 18). Le détail du choix est expliqué Tableau 19 et Tableau 20.

Paramètres	Intérêt
Première pluie >20mm	Date du premier semis
Date de semis effectif ²⁸ (Sivakumar (1988))	Date du premier semis qui aboutit (à comparer avec première pluie >20mm)
Cumul mois par mois	Identifier des excès d'eau (fin de saison)
Nombre de jours secs en août	Période critique pour les cultures (mil notamment, Winkel <i>et al.</i> (1997))
Nombre d'événements secs >10 jours	Durée critique de sécheresse
Date de fin de saison ²⁹	Durée de la saison

Tableau 18: paramètres retenus pour le choix des années

²⁸ Après le 1^{er} mai, il faut une pluie d'au moins 20 mm en 3 jours sans épisodes secs durant plus de 7 jours dans les 30 jours suivants la pluie de 20 mm

²⁹ Après le 1^{er} septembre, au moins 20 jours de suite sans pluie

Type	Année	Raisons du choix
Sèches	1968	Sécheresse en août, onset précoce
	1990	Une bonne année sèche : bon mois d'août, bon semis
	<u>1977</u>	Pas d'onset, mauvais cumul en juillet, nombreux jours secs en août, offset tardif
	<u>1996</u>	Bon cumul en juillet, possibilité de resemis
Normales	1997	Possibilité de resemis, mauvais cumul en juillet, onset précoce
	1976	Fort cumul en novembre, mauvais mois d'août
	<u>1992</u>	1ère pluie précoce, onset tardif (resemis possible)
	1981	Bonne année moyenne, pas de resemis, la prévision (décadaire) n'y est-elle pas inutile?
Humides	2005	La prévision (décadaire) n'y est-elle pas inutile?
	2000	Septembre et octobre très humides, démarrage précoce sans resemis
	1986	Resemis possible, faible cumul en juillet, année courte car offset précoce, mais reprise en septembre (excédent d'eau)
	<u>1979</u>	Resemis possible, mauvaise bonne année, (faible cumul en août et septembre)

Tableau 19: années sélectionnées à Paoskoto et raisons du choix. Les années soulignées sont celles qui seront effectivement utilisées (voir section 2.3)

Type	Année	Raisons du choix
Sèches	1990	Offset tardif, cumul important en octobre, faible en septembre
	2002	Première pluie et onset très tardif, pas de rattrapage par la suite
	1977	Pas d'onset mais resemis possible, cumul très faible en août
	1975	Cumul fort en juillet, bon semis, offset précoce
Normales	<u>1985</u>	Semis tardif, le reste est plutôt bon
	<u>1960</u>	Cumul fort en octobre et faible en septembre (fin précoce mais reprise), resemis possible
	1993	Départ un peu tardif mais globalement une bonne année (prévision décadaire inutile?)
	1984	Très mauvais mois d'août, bon cumul en juin mais resemis possible
Humides	2001	Sécheresse décadaire en août.
	<u>1966</u>	Départ tardif, très fort cumul en septembre et octobre, faible en juillet.
	2005	Onset tardif mais première pluie précoce: resemis possible. Les reste est globalement bon.
	1995	Onset tardif, resemis possible, sécheresse en juillet et début août, fort cumul en août

Tableau 20: années sélectionnées à Bacfassagal et raisons du choix. . Les années soulignées sont celles qui seront effectivement utilisées (voir section 2.3)

2.2.3 Les prévisions

Nous avons pris le parti dans ces ateliers d'utiliser une prévision proche de ce qui peut se faire réellement. Cela permet notamment de pouvoir évaluer l'impact qu'aurait, dès maintenant, la diffusion d'informations existantes. De plus, cela permet d'éviter de créer un excès de confiance vis-à-vis de ces prévisions chez les participants, en leur faisant croire artificiellement que les sciences climatiques sont dépourvues d'erreurs.

- Prévisions saisonnières

En utilisant un ensemble de modèles couplés océan-atmosphère du projet ENSEMBLES sur la période 1960/2005 (voir chapitre 1, page 30), nous avons calculé la probabilité pour chaque année d'être humide, normale ou sèche (selon le cumul pluviométrique JJAS), par rapport à toute la période 1960/2005.

Même si les prévisions saisonnières sont la plupart du temps diffusées de manière probabiliste³⁰ (Hansen *et al.* (2011)) cette information n'a pas été donnée sous cette forme aux participants, afin de ne pas introduire une notion supplémentaire. En effet, si la notion de probabilité n'est pas étrangère aux agriculteurs, il faut prendre un certain temps pour l'expliquer correctement (Ingram *et al.* (2002)). Pour pallier ce problème, nous avons traduit la prévision probabiliste sous forme de phrase type, retranscrite dans le Tableau 21 et le Tableau 22. Ces tableaux indiquent également si la prévision est vérifiée ou pas (colonne "observation").

Année	Probabilités (H/N/S)	Prévision	Observation (tercile)
<u>1960</u>	0.36/0.35/0.29	Année humide à normale	Normale
<u>1966</u>	0.49/0.27/0.23	Année humide (avec une bonne précision)	Humide
1975	0.33/0.33/0.35	Forte incertitude, peut-être sèche	Sèche
1977	0.33/0.35/0.32	Forte incertitude, peut-être normale	Sèche
1984	0.3/0.38/0.32	Année normale	Normale
<u>1985</u>	0.18/0.32/0.5	Année sèche (avec bonne précision)	Normale
1990	0.27/0.33/0.4	Année sèche	Sèche
1993	0.28/0.37/0.35	Année normale à sèche	Normale
1995	0.34/0.28/0.37	Forte incertitude, peut-être sèche	Humide
2001	0.33/0.38/0.29	Année normale	Humide
2002	0.21/0.39/0.39	Année normale à sèche	Sèche
2005	0.51/0.28/0.21	Année humide (bonne précision)	Humide

Tableau 21: prévision saisonnière et tercile observé pour chaque année sélectionnée à Bacfassagal. Les années soulignées sont celles qui seront effectivement utilisées (voir section 2.3)

³⁰ les ateliers de l'ANAMS, auxquels j'ai pu participer à Kaffrine (Sénégal) forment ainsi les agriculteurs à une prévision probabiliste

Année	Probabilités (H/N/S)	Prévision	Observation (tercile)
1968	0.29/0.33/0.37	Année sèche	Sèche
1976	0.24/0.38/0.38	Année normale à sèche	Normale
<u>1977</u>	0.33/0.35/0.32	Forte incertitude, peut-être normale	Sèche
<u>1979</u>	0.39/0.32/0.29	Année humide	Humide
1981	0.29/0.40/0.31	Année normale	Normale
1986	0.26/0.33/0.41	Année sèche	Humide
1990	0.27/0.33/0.4	Année sèche	Sèche
<u>1992</u>	0.28/0.37/0.36	Année normale à sèche	Normale
<u>1996</u>	0.36/0.35/0.29	Année humide à normale	Sèche
1997	0.40/0.31/0.29	Année humide	Normale
2000	0.31/0.36/0.33	Forte incertitude, peut-être normale	Humide
2005	0.51/0.28/0.21	Année humide (bonne précision)	Humide

Tableau 22: prévision saisonnière et tercile observé pour chaque année sélectionnée à Paoskoto. . Les années soulignées sont celles qui seront effectivement utilisées (voir section 2.3)

- Prévisions décennales

Les données de prévisions décennales dont nous disposons ne couvrent que les années 1985/2000, alors que les pluies observées que nous utilisons aussi dans ce chapitre sont sur 1950/2010. On ne peut donc utiliser ces prévisions décennales en l'état, puisque de nombreuses années sont manquantes. On cherche donc à créer des prévisions fictives qui reproduisent globalement l'erreur des prévisions dont nous disposons sur 1985/2000.

Pour cela, nous avons tout d'abord discrétisé ces prévisions en trois classes de pluie (< 10mm ; [10:80mm] ; >80mm). Afin de pouvoir comparer avec les pluies observées et de limiter un potentiel biais systématique (*i.e.* une surestimation ou sous-estimation systématique de la quantité de pluie) dans les données de prévision nous avons transformé ces seuils 10 mm et 80 mm en pluie équivalente pour chacun des deux villages. Nous avons en effet calculé, dans la distribution observée, le quantile associé à chaque seuil (10 et 80mm) que nous avons ensuite converti en "seuil équivalent" via la distribution des prévisions. On obtient ainsi les équivalences présentées dans le Tableau 23.

Nous avons alors calculé pour chaque village le tableau de contingence pluie décennale observée vs. prévision décennale, ainsi que deux indicateurs de précision de la prévision : le taux de prévision avérée (Hit Rate, HR)) et la probabilité de se tromper lorsqu'on prévoit un type d'événement (False Alarm Rate, FAR (Tableau 24)) (pour le calcul du FAR et HR, voir les annexes page 179). Globalement, les décades sèches sont plutôt prévues de façon efficace (HR= 0.64 et 0.73) alors que les décades très pluvieuses le sont moins. De plus, on peut noter que le FAR des décades très humides est élevé (0.67 et 0.77) alors que celui des décades sèches est relativement limité (0.44 et 0.34). Cela signifie que la probabilité lorsqu'on prévoit un événement très pluvieux qu'en réalité il ne pleuve pas (ou peu) est importante. Cela peut avoir une incidence sur l'utilisation de la prévision.

Enfin, nous avons généré des prévisions décennales aléatoirement de manière à avoir sur l'ensemble de la chronique le même tableau de contingence qu'avec les prévisions 1985/2000. Les prévisions effectivement données lors des ateliers sont précisées en annexe, page 181, sur les histogrammes en utilisant l'une des trois catégories de pluie (" $< 10 \text{ mm}$ ", " $[10:80 \text{ mm}]$ ", " $> 80 \text{ mm}$ ").

	Seuil correspondant à 10 mm	Seuil correspondant à 80 mm
Paoskoto	1 mm	40 mm
Bacfassagal	7 mm	64 mm

Tableau 23: équivalence pour les seuils "10 mm" et "80mm" dans les deux villages

	Catégorie de prévision	Hit Rate (HR)	False Alarm Rate (FAR)
Paoskoto	< 10 mm	0.64	0.44
	[10:80 mm]	0.47	0.48
	> 80 mm	0.33	0.67
Bacfassagal	< 10 mm	0.73	0.35
	[10:80 mm]	0.44	0.52
	> 80 mm	0.20	0.77

Tableau 24: précision de la prévision décadaire via deux indicateurs: le Hit Rate et le False Alarm Rate, pour chaque village et chaque catégorie de pluie (données sur 1985/2000)

2.3 L'évolution de conception des ateliers durant le jeu

Cette section présente les évolutions qui ont eu lieu pendant les ateliers suivant les commentaires des participants et nos constatations. Les deux ateliers n'ont ainsi pas eu exactement la même structure mais le concept et le déroulement de base sont restés les mêmes.

2.3.1 Nombre d'années et gestion de l'atelier

- Nombre d'années

Dès le début du premier atelier, nous avons clairement perçu qu'il était illusoire de vouloir faire deux tours de douze années et que nous allions devoir nous limiter à trois ou quatre années, plus une année d'essai au tout début. La période d'apprentissage du jeu et des couleurs est en effet beaucoup plus longue que prévu (une demi-journée voire plus), et même si nous avons plus de temps, il y a un "effet lassitude" clair après quatre années de suite sans apport d'un nouvel élément.

Ainsi nous avons retenu seulement quatre années à Paoskoto (1977, 1979, 1992, 1996) et trois années (1960, 1966, 1985) à Bacfassagal, parmi la sélection faite au préalable (Tableau 25). Nous avons décidé de prendre seulement trois années dans le deuxième village afin d'avoir des temps de discussion plus longs avec les exploitants. En effet, en voulant faire quatre années, la discussion de Paoskoto n'a pas été aussi approfondie que prévu, tout comme le commentaire après chaque année.

Village	Année	Prévision	Observation
Paoskoto	1977	Forte incertitude, peut-être normale	Sèche
	1979	Année humide	Humide
	1992	Année normale à sèche	Sèche
	1996	Année humide	Normale
Bacfassagal	1960	Année humide à normale	Normale
	1966	Année humide (avec une bonne confiance)	Humide
	1985	Année sèche (avec bonne confiance)	Normale

Tableau 25: années effectivement utilisées pendant les ateliers

- Déroulement des ateliers (Figure 61)

Nous avons également modifié à Bacfassagal la transition entre les deux tours de jeu. Il est en effet clair qu'à Paoskoto les différences entre les deux types de prévisions ne sont pas apparues nettement: ainsi les participants ont peut-être perçu moins clairement ce qu'ils pouvaient faire pratiquement de ces informations. De ce fait, l'explication des prévisions donnée au deuxième tour a été largement étoffée et surtout restructurée. Tout d'abord, pour éviter les confusions, les

informations concernant la prévision et celles concernant la pluie observée ont été données par des personnes différentes. Les explications préliminaires ont de plus mis l'accent sur la différence entre prévision décadaire et prévision saisonnière, en faisant un parallèle avec les prévisions localement utilisées par les agriculteurs. Cette différence a également été représentée symboliquement par leur moyen de diffusion: l'ordinateur pour les saisonnières et la radio pour les décadaires. Afin de mieux saisir les réactions des agriculteurs aux prévisions, nous avons également introduit à la fin de chaque année une phase de commentaires approfondis sur la prévision et son utilisation.

De même, nous avons introduit après chaque année, et avant la notation du rendement, une phase de commentaires de groupe sur les caractéristiques de l'année. Cette évaluation du rendement a de plus été expliquée avec plus d'insistance pour souligner le caractère exceptionnel des notes 1 et 5.

	Demi-journée 1	Demi-journée 2	Demi-journée 3	Demi-journée 4
P a o s k o t o	<ul style="list-style-type: none"> - Explications générales et codes couleurs - Début de l'année d'essai 	<ul style="list-style-type: none"> -Tour n°1: années 1977, 1979 et 1992 -Entre chaque année: commentaires - Début des questionnaires 	<ul style="list-style-type: none"> -Tour n°1: année 1996 -Introduction rapide aux prévisions -Tour n°2: années 1979, 1977, 1992 	<ul style="list-style-type: none"> -Tour n°2: année 1996 -Discussion générale: les prévisions locales, les avis sur les prévisions scientifiques etc... -Fin des questionnaires
B a c f a s s a g a l	<ul style="list-style-type: none"> - Explications générales et codes couleurs - Début de l'année d'essai, 1960 (tour n°1) 	<ul style="list-style-type: none"> -Tour n°1: année 1966 (avec commentaires) - Début des questionnaires 	<ul style="list-style-type: none"> -Tour n°1: année 1985 - Introduction aux prévisions en se fondant sur les prévisions locales - Tour n°2: années 1960, 1966 (avec commentaires) 	<ul style="list-style-type: none"> -Tour n°2: année 1985 -Discussion générale: les avis sur les prévisions scientifiques etc... -Fin des questionnaires

Figure 61: résumé du déroulement des ateliers à Paoskoto et Bacfassagal

2.3.2 Support de restitution

Le support de restitution a également fait preuve de modifications au cours des deux ateliers. Tout d'abord, les exploitants avaient des difficultés à se placer dans la bonne colonne de temps: nous avons donc remplacé les en-têtes de colonne ("juin.1") par une numérotation plus pertinente, et nous avons symbolisé l'absence d'action culturelle par une croix, au lieu de laisser un blanc, ce qui permet au joueur de toujours bien se situer dans le temps. D'autre part, plusieurs participants de Paoskoto ont fait remarquer que les couleurs employées (Photo 4) étaient trop nombreuses et trop proches. Nous avons donc simplifié le code couleur pour Bacfassagal, en restreignant les activités culturelles et en évitant les nuances de couleurs. Le Tableau 26 détaille le changement dans les activités considérées et le code couleur.

Activité culturelle	Paoskoto	Bacfassagal
Préparation du champ	Rouge	Pas pris en compte
Fumure	Noir	Noir
Labour lourd	Vert foncé	Rouge
Labour léger	Vert clair	
Labour tracteur	Croix verte	
Semis	Jaune	Jaune
Engrais	Violet	Bleu
Produit chimique	Bleu	Violet
Sarclobinage manuel	Rose	Vert
Sarclobinage attelé	Orange	
Démariage	Marron	Pas pris en compte
Symbole de récolte	Croissant	Cercle
Symbole d'évaluation du rendement	Etoile	Barre
Aucune action	Grande croix	Grande croix

Tableau 26: évolution du code couleur entre les deux ateliers



Photo 4: présentation du code couleur à Paoskoto

3. Résultats et discussion

3.1 Les participants et leurs pratiques

3.1.1 Description des groupes de participants et des exploitations

Une mission préliminaire (avril 2011) a permis de prendre contact avec certains exploitants pour leur expliquer le principe des ateliers et pour préciser les profils des futurs participants souhaités. Afin d'avoir un panel le plus représentatif possible, nous avons donc précisé qu'il faudrait un groupe mixte, avec de petits et de grands exploitants, des jeunes et des moins jeunes. Nous avons insisté sur le fait qu'il ne fallait pas qu'il y ait uniquement les notables du village. Afin de ne pas avoir trop de participants, nous avons limité leur nombre à seize, tout en laissant à d'autres la possibilité de suivre le jeu et d'intervenir, mais leurs résultats n'ont pas été dépouillés quantitativement. Les caractéristiques de base des deux groupes de seize agriculteurs sont présentées dans le Tableau 27. Tout d'abord, il est clair que les femmes ont été tenues à l'écart des ateliers (Photo 5), comme à Bacfassagal où l'une d'elles nous a clairement dit qu'on leur avait demandé de ne pas venir. Cependant, certaines d'entre elles ont tout de même assisté aux ateliers et ont même rempli les feuilles de jeu (mais leurs résultats ne sont pas comptabilisés comme elles n'ont pas fait toutes les années).



Photo 5: groupe de participants de Paoskoto

Les groupes étaient constitués d'exploitants ayant une certaine expérience: à l'exception de deux participants de Paoskoto (20 et 22 ans), tous les autres avaient 30 ans ou plus. Le taux de scolarisation est plus élevé à Paoskoto qu'à Bacfassagal où il demeure assez faible (5 participants /14). La grande majorité d'entre eux a un accès facile aux informations extérieures grâce à un nombre important de radios et de téléphones portables. Dans les deux villages, tous les exploitants possèdent des animaux, mais n'en font pas forcément commerce. La superficie est légèrement supérieure à Paoskoto, ce qui est probablement dû à une forte représentation des membres de la coopérative (14/16) qui ont obligatoirement au moins 2 hectares pour l'arachide semencière. On peut noter que la superficie moyenne cultivée de Bacfassagal est proche des 4.7 ha rapportée par Dione *et al.* (2008) pour le bassin arachidier. De plus, si cette dernière étude rapporte un âge moyen du chef d'exploitation plus élevé que ceux du Tableau 27, Diop (2006) donne dans la région de

Kaolack un âge du chef d'exploitation de 48 ans, et 8.6 actifs, en moyenne. Enfin, Dione *et al.* (2008) trouve que l'agriculture a une part de 82% dans les revenus des exploitations, ce qui est quantitativement proche de nos résultats. Cependant, ces deux études rapportent un nombre plus faible de charrues (<10 %). Dans notre cas, il peut y avoir eu dans le questionnaire une méprise entre charrue empruntée et possédée.

Finalement, il semble donc que notre panel soit assez proche d'autres études réalisées dans la région, notamment au niveau de la superficie cultivée et du nombre d'actifs. Cependant, il existe clairement un biais important dû à l'absence de femme.

Paramètres	Bacfassagal	Paoskoto
Age moyen (écart-type)	48.9 (13)	42.3 (12)
Nombre de femmes	0	0
Nombre de participants avec un niveau d'éducation au moins primaire ou coranique.	5/14	8/15
Taille moyenne du foyer (individus)	15.5	12.6
Nombre moyen d'actifs (individus)	9.7	7.6
Nombre total de téléviseurs	3	0
Nombre total de radios	11	12
Nombre total de portables	15	13
Nombre de membres de la coopérative	X	14
Superficie totale moyenne (ha)	5.1	8.7
Nombre moyen d'animaux (âne, chèvres, moutons, bovins, chevaux)	12.5	11.2
Nombre total de charrues possédées	5	3

Tableau 27: descriptif du panel d'agriculteurs

3.1.2 Sous-échantillon

Si on a présenté précédemment des résultats concernant tous les participants, le reste de l'étude se fera sur un sous-échantillon. En effet, l'analyse des feuilles a révélé que ce support n'avait pas permis à tous les participants de retranscrire de manière efficace leurs pratiques. Cela ne permet donc malheureusement pas d'utiliser leurs résultats de façon quantitative. A Bacfassagal, on relève trois joueurs dont les fiches ne sont pas exploitables, et quatre à Paoskoto.

Les éléments permettant de repérer les personnes ayant produit des résultats qu'on ne peut pas interpréter sont: le mélange dans les couleurs, l'ajout de couleurs non-référencées, l'oubli du semis, l'oubli de la récolte, des pratiques culturelles totalement différentes entre deux années, l'oubli de remplir les colonnes grises. Nous avons de plus repéré certains de ces joueurs durant les ateliers qui devaient avoir recourt à l'aide d'une autre personne (malheureusement pas permanente) pour remplir leur feuille. D'autres fiches encore ont produit des résultats incohérents car la première personne ayant commencé à les remplir a dû s'absenter et a donc cédé sa place à quelqu'un d'autre. On peut noter qu'il ne semble pas se dégager de profil type (âge, éducation...) pour les joueurs dont les fiches ne sont pas exploitables.

Les résultats quantitatifs issus des fiches de jeu seront donc présentés pour les 12 (Paoskoto) et les 13 (Bacfassagal) participants avec des résultats utilisables. En revanche, les résultats qualitatifs tout comme les informations issues du questionnaire sont fondés sur tous les participants.

3.1.3 Techniques culturelles employées

- Types de cultures

Les deux villages n'ont pas exactement les mêmes systèmes cultureux à cause d'une part de la présence de la coopérative semencière mais également de la différence au niveau de la pluviométrie. Dans les deux villages, on trouve en abondance de l'arachide (en moyenne 1.7 ha à Bacfassagal et 3.9 ha à Paoskoto) et du mil (2.5 ha et 2.9 ha), mais pas systématiquement avec les mêmes variétés (Tableau 28). De plus, si trois variétés de mil ont été évoquées durant la première mission à Paoskoto, une seule (Souna 3) a été utilisée durant les ateliers. Celle-ci est également semée abondamment à Bacfassagal, mais un autre cultivar (Sanio) qui avait été abandonné à la fin des années 70 a été réintroduit depuis l'amélioration très récente de la pluviométrie. Concernant l'arachide, les variétés sont plus systématiquement diversifiées à Paoskoto où cinq cultivars sont utilisés. A Bacfassagal, les deux variétés principales sont Fouré et Fouré diaobé (arrivée il y a 15 ans), et certains ont apparemment commencé à utiliser récemment la Fleur 11, ce qui n'apparaît pas dans les ateliers. D'autres cultures plus marginales sont présentes dans les deux cas : sorgho, niébé et pour certains pastèque et citrouille.

Le maïs (cultivar early thai) est quant à lui une des spécificités principales de Paoskoto (1.3 ha en moyenne), avec le riz pluvial que certains ont commencé à semer depuis peu. Le niébé est presque uniquement semé à Bacfassagal (0.5 ha en moyenne) et par un seul des seize participants de Paoskoto.

Village	Cultures	Variétés	Caractéristiques
Bacfassagal	Mil	Souna 3	Cycle court
		Sanio	Cycle long, nécessite plus d'eau, plus de vitamines, plus de biomasse aérienne, sur sols deck en général
	Arachide	Fouré (55-437)	Variété ancestrale, cycle <100j
		Fouré diaobé	Depuis 15 ans. Meilleure productivité
		Fleur 11	Bonne productivité, cycle >100j
	Sorgho	Congosall	Cycle long, semis à sec ou avant la pluie
		Fela	Pas de semis à sec
	Niébé	rouge	Semis en juin, dans l'arachide
		noir	Semis en juillet, dans le mil
		blanc	Semis en juin, dans l'arachide
Paoskoto	Mil	Souna3	Cycle de 90j (cultivar le plus utilisé)
		Souna2	Cycle de 80j
		Souna1	Cycle de 70j
	Arachide	28-206	Cycle >100j
		73-33	Cycle >100j
		GH 119	Cycle >100j
		Fleur 11	Bonne productivité, cycle >100j, résistance à la sécheresse
		55-437	Cycle < 100j, résistance à la sécheresse
	Maïs	Early thai	Cycle de 70 jours

Tableau 28: cultures, variétés et leur caractéristiques (informations collectées sur le terrain et CIRAD *et al.* (2004))

On note donc dans les deux villages un nombre assez important de cultures et de variétés différentes, surtout pour l'arachide, ce qui laisse supposer une réaction potentielle à la prévision saisonnière. On a en effet vu dans le chapitre précédent (page 99) que le choix de la culture est en effet une stratégie d'utilisation de cette information (Ingram *et al.* (2002); Roudier *et al.* (2011b))

- L'utilisation d'intrants et de fumure

Comme souligné par CIRAD *et al.* (2004), l'utilisation d'intrants (*e.g.* engrais, pesticides, fongicides) peut avoir un effet notable sur la production. Si l'utilisation d'intrants est relativement faible en Afrique sub-saharienne, c'est moins le cas dans les villages de l'étude où la majorité des participants a déclaré utiliser des engrais chimiques (15/16 à Bacfassagal et 13/16 à Paoskoto) et des produits phytosanitaires (16/16 à Bacfassagal et 13/14 à Paoskoto). La proximité d'une route principale et de deux villes importantes (Diourbel et Nioro du Rip) peut expliquer cette différence. De plus, le Sénégal est un des rares pays de la sous-région à exploiter ses gisements de phosphate (avec le Togo et le Nigeria) et est ainsi l'un des principaux pays fournisseur d'intrants d'Afrique de l'Ouest (IFDC - International Fertilizer Development Center (2004)). Dans les deux localités étudiées ici, si les engrais sont employés pour le mil et/ou l'arachide en général, les produits phytosanitaires le sont majoritairement pour l'arachide, voire le maïs. Il faut noter que dans les deux villages, les participants ont souligné comme un problème principal le manque de disponibilité des engrais et leur prix élevé.

L'amélioration de la fertilité des sols peut également se faire par un apport de fumure organique. Les participants aux ateliers possédant tous des animaux (en moyenne 12.5 ânes, chèvres, moutons, bovins, chevaux à Bacfassagal et 11.2 à Paoskoto), ils peuvent donc réaliser un tel amendement sur leurs champs. Ainsi, quasiment tous les participants ont simulé pendant le jeu un apport de fumier sur au moins une des parcelles, fréquemment sur le mil. Cela se déroule en général au tout début de la période de jeu (fin mai), en même temps que la préparation des champs.

- Les pratiques culturales sur la parcelle

Outre l'utilisation des intrants, les agriculteurs appliquent des pratiques et des calendriers cultureux bien définis, qui sont résumés pour les trois principales cultures dans le Tableau 29. Le labour avant le semis est pratiqué uniquement à Paoskoto et majoritairement pour le maïs et l'arachide. Notons également que les produits phytosanitaires sont assez fréquents pour l'arachide et le maïs, au moment du semis. Certains agriculteurs nous ont précisé qu'il s'agissait de Granox, un mélange destiné au traitement des semences. Les fertilisants chimiques sont utilisés sur les trois cultures (sauf l'arachide à Bacfassagal), généralement durant le cycle de croissance. Globalement, ces pratiques sont assez proches des recommandations des organismes agricoles (par exemple Aquadev Sénégal (sans date)).

Le choix du type de culture se fait également en fonction du sol de la parcelle. L'arachide sera, tout comme le mil, de façon majoritaire sur des sols légers de type dior ou deck/dior alors que le maïs sera préféré sur les sols plus riches et plus lourd de type deck voire deck/dior. Les champs de case peuvent recevoir ces cultures, mais si l'agriculteur sème par exemple des pastèques, il les mettra majoritairement sur les champs de case. On nous a également précisé que le mil sanio à cycle long (Bacfassagal) était semé lors d'années pluvieuses sur des sols plutôt argileux (qui retiennent plus l'eau).

Ainsi, la diversité des pratiques culturales montrent que les agriculteurs ont potentiellement plusieurs niveaux d'ajustement aux prévisions saisonnières et décadaires.

	Mil	Maïs (Paoskoto)	Arachide
Fumure	Fréquent, fin mai	Fréquent, début juin	Plus rare que pour le mil, fin mai
Labour	Très rare	Fréquent, avec la 1ère pluie >20mm, 10 jours avant semis	-Paoskoto: Assez fréquent, avec la 1ère pluie, 10 jours avant semis. -Bacfassagal : non
Semis	-Bacfassagal : A sec, début juin -Paoskoto: si onset tardif: pour la plupart à sec, certains avec la pluie	Avec la pluie (1ère ou 2e grosse pluie, selon la précocité et selon le labour)	-Paoskoto: Avec la 1ère pluie >20 mm, ou la 2e si la 1ère est précoce -Bacfassagal: id
Engrais chimique	-Paoskoto : fréquent, 4 à 5 décades après le semis -Bacfassagal : assez fréquent, 4 à 5 décades après la première pluie efficace.	Fréquent. 1 à 2 apports, le premier 1 ou 2 décade après semis, le 2e 4 semaines plus tard	-Paoskoto: très fréquent, 1 à 4 semaines après semis. -Bacfassagal: rare
Produits phyto	-Paoskoto: peu fréquent, au semis -Bacfassagal: rare	Assez fréquent, au moment du semis	-Paoskoto: fréquent, au semis. -Bacfassagal: fréquent, au semis
Récolte	-Paoskoto: octobre, durant les décades peu pluvieuse -Bacfassagal: fin septembre, octobre durant les décades peu pluvieuses	Octobre, varie selon semis. Lors de décades sèches ou peu pluvieuses	-Paoskoto: octobre/début novembre -Bacfassagal: de fin septembre à début novembre
Particularités	-Bacfassagal: semis dans le champ d'une autre culture (niébé) en intercropping	Plutôt sur deck et deck/dior	-Paoskoto : sur dior ou deck/dior

Tableau 29: description des pratiques culturales pour les trois grandes cultures, selon les villages

3.2 Les prévisions fondées sur les connaissances des agriculteurs

Si les fiches de jeu permettent de quantifier, dans une certaine mesure, l'impact des prévisions sur les pratiques culturales, les discussions entre chaque année et à la fin de l'atelier sont également une étape importante. Cela permet en effet de laisser les participants s'exprimer de façon plus libre sur des thèmes que la feuille de jeu ne peut pas retranscrire, comme leurs propres prévisions. D'autre part, toutes les personnes qui ont assisté aux ateliers en tant que simples spectateurs avaient la possibilité d'intervenir durant ces discussions, ce qui donne une plus grande diversité dans les contributions, notamment concernant les prévisions des agriculteurs, qu'on nommera "prévisions locales", pour les différencier des prévisions "scientifiques" que nous leur proposons. Cette terminologie est choisie en suivant celle de Roncoli *et al.* (2002) et comprend par

scientifique le "savoir généré par des experts utilisant des approches reconnues et rigoureuses d'observation et d'expérimentation".

Ainsi, si nous proposons durant ces ateliers aux agriculteurs un système de prévision décennale et saisonnière, ils ont eux-mêmes élaboré depuis longtemps leurs propres moyens de prévisions météorologiques. De récentes études en Afrique de l'Ouest (Roncoli *et al.* (2002)) et de l'Est (Luseno *et al.* (2003)) ont montré leur diversité et l'intérêt de les prendre en compte lors de la diffusion de prévisions saisonnières (Ziervogel et Opere (2010)). Roncoli *et al.* (2002) rapportent ainsi pour le Burkina Faso que les agriculteurs observent majoritairement la production fruitière de certains arbres et les températures durant la saison sèche afin de prévoir la saison pluvieuse. Notons que, dans ce cas, les prévisions sont saisonnières car les phénomènes observés durant la saison sèche informent sur la quantité d'eau globale de la saison pluvieuse. D'autres types de prévisions sont également accessibles aux agriculteurs via la consultation d'experts tels que les marabouts.

Lors de ces ateliers au Sénégal, plusieurs personnes nous ont indiqué l'existence de moyens de prévisions des pluies. La plupart de ces moyens se fonde sur l'observation de phénomènes naturels. Ainsi, plusieurs personnes ont indiqué l'importance du coassement des grenouilles en début et fin de saison. Après une pluie, "si les grenouilles continuent à chanter, cela signifie que la pluie va continuer". La température avant la saison des pluies a également été citée. Cependant, si durant notre première visite à Paoskoto certains dirigeants de la coopérative nous avaient indiqué que de fortes températures durant la saison sèche indiquaient un hivernage humide, cette information a été corrigée lors des ateliers (deuxième mission). Une forte température indiquerait finalement l'arrivée imminente des pluies: les agriculteurs identifient donc plus cette information à une prévision décennale (ou à court terme) qu'à une prévision saisonnière. D'autres phénomènes naturels indiquent que la pluie est imminente. Le chant de certains oiseaux a été ainsi cité par plusieurs participants, certains précisant même que lorsque les oiseaux en question chantent, la pluie arrive une semaine après. De même, avant le début de la saison, lorsque les baobabs et les tamariniers font de nouvelles feuilles ou bien lorsque certaines étoiles apparaissent dans le ciel, cela signifie que la pluie est proche. Ainsi, il semble que dans ces deux villages les agriculteurs utilisent l'observation de phénomènes naturels pour prédire la pluie à court terme plutôt qu'au niveau de la saison. Si les indicateurs utilisés sont similaires à ceux décrits par Roncoli *et al.* (2002), leur échelle temporelle est différente. Il se peut cependant que tous les systèmes de prédictions n'aient pas été décrits durant les discussions, et que des moyens de prévisions saisonniers n'aient pas été abordés.

Quant aux prévisions des participants qui ne se fondent pas sur l'observation, si certains ont parlé du rôle des marabouts qui font chacun leurs propres prévisions, les agriculteurs de Bacfassagal ont insisté sur la tenue d'une séance de lutte dans le village. Celle-ci se tient le quatrième mois de l'année lunaire; il faut alors attendre un mois supplémentaire avant de semer le mil. Cette séance de lutte est ainsi plus une indication sur la date de semis que sur la qualité de la saison des pluies.

Cependant, si plusieurs personnes ont évoqué des prévisions de ce type, tous les participants ne les utilisent pas. Comme on nous l'a précisé à Paoskoto, ce sont surtout les plus anciens qui détiennent ce genre de savoir, ce qui a été confirmé par les rires des deux plus jeunes participants (20 et 22 ans) lorsqu'on leur demandait s'ils utilisaient ces prévisions. Au total, 7 participants sur 26 ont déclaré ne pas connaître ou ne pas faire du tout attention à ce genre d'informations locales. Les autres ont globalement le même avis sur ce type de prévision. Si personne ne prétend que celles-ci ne se trompent jamais, la plupart des participants juge qu'elles sont assez efficaces.

Comme cela a été montré dans d'autres régions, les participants de ces ateliers utilisent donc majoritairement certains systèmes de prévision locaux afin de connaître la pluie à venir. Cependant, et contrairement aux autres études, nous n'avons pas relevé dans les discussions de prévisions saisonnières donnant une informations sur la qualité globale de la saison: il se peut également qu'un biais, par exemple dans la traduction, ne nous ait pas permis de saisir l'existence de prévisions saisonnières.

3.3 Utilisation des prévisions scientifiques décadaires

3.3.1 Résultats issus des discussions

Tous les participants ont déclaré attendre les prévisions décadaires à chaque décade avant de décider quoi faire: cela leur permet en effet de régler leur calendrier culturel. Il est cependant plus difficile d'avoir oralement des exemples concrets. Selon certains d'entre eux, ces informations décadaires semblent particulièrement intéressantes pour le semis et surtout la récolte. Ainsi, si le mil est arrivé à maturation et que les prévisions prévoient une pluie pour la prochaine décade, cela pousse l'exploitant à récolter sans attendre. Comme on l'a vu dans les chapitres précédents, un excès d'eau en fin de cycle a un impact négatif sur la production (moisissures, ravageurs...). Au semis, si la décade suivant une grosse pluie est supposée sèche, ils peuvent attendre pour semer (surtout si cette première pluie est précoce). D'autre part cette information peut aider pour savoir quand sarcler. Si une forte pluie est annoncée, il est pertinent d'aller sarcler sans attendre car la pluie va fortifier les mauvaises herbes et étouffer les cultures. De plus, lorsque les pluies sont vraiment violentes, l'accès aux champs est difficile et les travaux de sarclage aussi. Les prévisions décadaires ont permis aussi à certains de gérer le semis de cultures en *intercropping* (couplage de deux cultures dans le même champ) au cours de l'hivernage. C'est le cas d'un participant (Bacfassagal) qui en fin de saison a déclaré avoir semé du niébé dans le mil souna car les sols étaient encore humides et la prévision décadaire prévoyait une pluie importante. Notons que la prévision décadaire semble avoir été plus utilisée à Bacfassagal, ou a en tout cas suscité plus de réactions. Cela peut venir du mode de présentation de cette prévision qui a été amélioré entre les deux ateliers.

3.3.2 Résultats issus des feuilles de jeu

Ces commentaires oraux se retrouvent partiellement dans l'étude des fiches de jeu, même si on ne peut pas dire que tous les paysans utilisent systématiquement les prévisions décadaires pour modifier leurs pratiques culturelles. Notons que pour l'impact des prévisions décadaires, nous ne tenons pas compte de l'année 1996 car nous avons, au tour n°2, sauté involontairement une décade ce qui ne permet plus de comparé des années identiques.

- Impact sur la date de semis

Les Figure 62 et Figure 63 représentent la différence de date de semis moyenne sur toutes les parcelles de tous les exploitants pour la culture concernée (arachide, mil ou arachide). Les moyennes sont ainsi calculées sur des ensembles comprenant entre 12 à 20 points à Paoskoto et 26 à 31 à Bacfassagal, selon les cas. Les moyennes qui sont significativement différentes à 5%³¹ sont représentées par une étoile.

³¹ les échantillons étant ici petits et pas forcément gaussiens, on n'emploie ni le z-test ni le t-test mais le test non paramétrique de Wilcoxon Mann-Whitney, moins puissant que les deux autres mais qui ne fait pas d'hypothèse sur la distribution ni sur la taille de l'échantillon (<http://127.0.0.1:29066/library/stats/html/wilcox.test.html>)

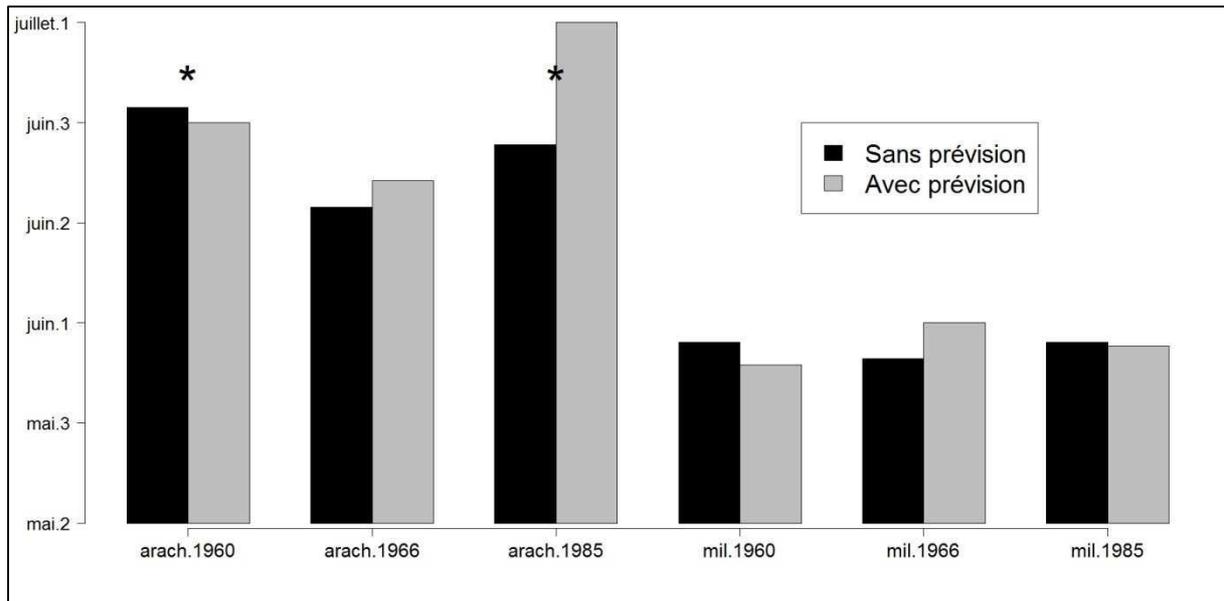


Figure 62: évolution de la date de semis moyenne en réaction aux prévisions, à Bacfassagal, pour les deux principales cultures. Les différences statistiquement significatives à 5% sont indiquées par une étoile.

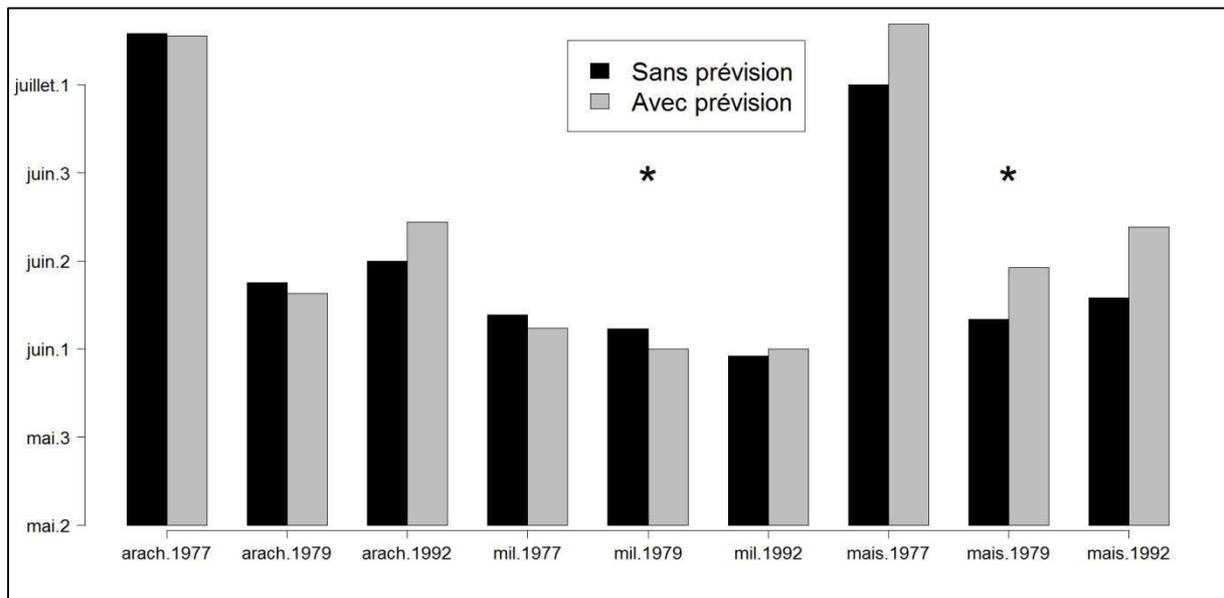


Figure 63: évolution de la date de semis moyenne en réaction aux prévisions, à Paoskoto, pour les trois principales cultures. Les différences statistiquement significatives à 5% sont indiquées par une étoile.

Ces figures montrent ainsi que la prévision n'induit pas systématiquement, chaque année et pour chaque culture un changement significatif de la date de semis. De plus, on ne remarque des différences franches (et significatives à 5%) que pour:

- le maïs de Paoskoto en 1979 (Figure 64) : quasiment tous les agriculteurs qui semaient le maïs début juin ont retardé leur semis à milieu juin, décade annoncée comme très pluvieuse. Ils ont probablement voulu éviter cette grosse pluie juste après les semis car elle est susceptible de les détruire, et les prive également de lumière. Les participants ne sont probablement pas effrayés par la prévision d'une décade sèche fin juin car la pluie est très importante (145 mm, Figure 64) et peut compenser le déficit hydrique.

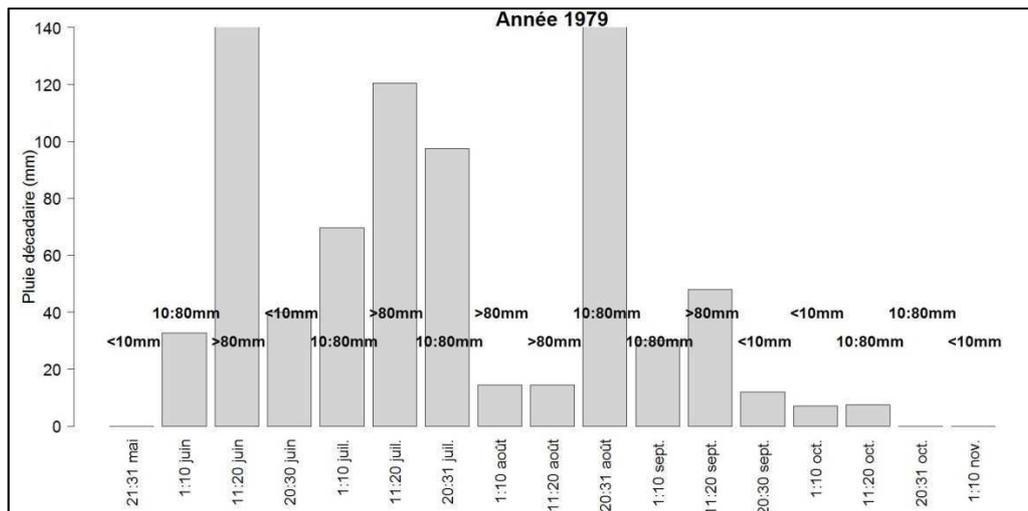


Figure 64: profil pluviométrique de l'année 1979 avec la prévision décadaire donnée aux participants (en gras sur deux lignes)

- l'arachide de Bacfassagal en 1985 (Figure 65): les exploitants qui ont globalement semé à la dernière décade de juin (20 mm, Figure 65) au tour n°1 et ont retardé leur semis au tour n°2 en réaction à la prévision d'une décade sèche début juillet. Un comportement similaire est observable pour trois participants en 1966 qui cherchent ainsi à éviter plusieurs décades sans eau.

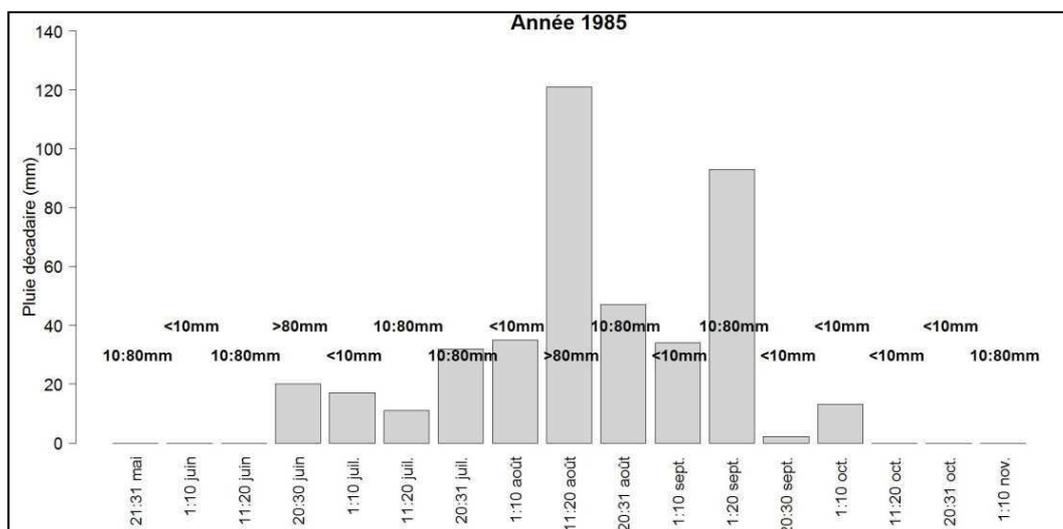


Figure 65: profil pluviométrique de l'année 1985 avec la prévision décadaire donnée aux participants (en gras sur deux lignes)

Pour le maïs de Paoskoto en 1977 (Figure 66), le changement n'est pas statistiquement significatif, mais plusieurs exploitants ayant semé avec la pluie de la deuxième décade de juin (Figure 66) ont décalé leur semis lors du tour n°2. En effet, la prévision d'une décade sèche fin juin les a poussés à semer plus tard, début ou fin juillet. Notons que plusieurs agriculteurs n'ont pas modifié leur semis car ils avaient déjà attendu, au tour n°1, fin juillet pour semer. Ce décalage du semis observé ne se retrouve pas sur l'arachide, car les exploitants l'ont semée au tour n°1 de façon tardive (fin juillet) ou bien n'ont pas suivi la prévision pour cette culture. On peut voir dans cette utilisation de la prévision uniquement pour le semis du maïs une stratégie de minimisation du risque. Quant au mil, son semis ne peut pas être ici influencé par une telle information puisqu'il est réalisé plus tôt et à sec.

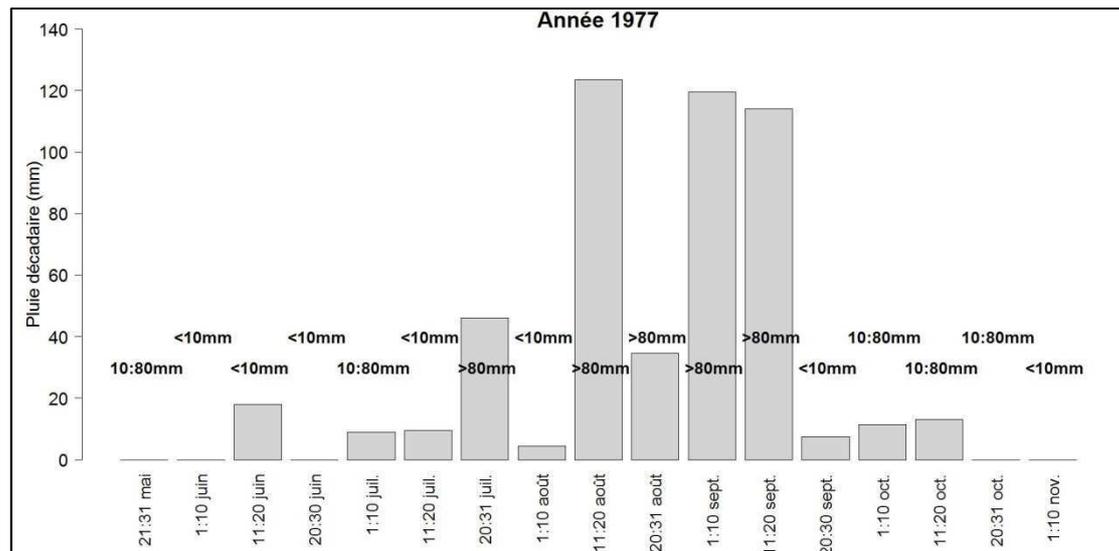


Figure 66: profil pluviométrique de l'année 1977 avec la prévision décadaire donnée aux participants (en gras sur deux lignes)

Notons que ce report de semis dû à une décade sèche n'a quasiment jamais lieu pour le mil. Par exemple, à Paoskoto en 1992, toutes les cultures sont exceptionnellement semées ensemble au tour n°1 pendant la deuxième décade de juin. Au tour n°2, il est prévu que la troisième décade de juin soit sèche (Figure 67): on observe alors que certains exploitants retardent leur semis d'arachide et de maïs, mais pas de mil. On peut penser qu'ils considèrent que dix jours sans pluie n'est pas une période suffisante pour tuer les plants ou bien que cela est moins important que pour les autres cultures, à cause du coût des semences. On peut aussi y voir encore une stratégie de diversification des risques. De plus, il faut souligner que cette technique de report du semis n'est possible qu'au début de la saison. Ainsi, certains exploitants reportent le semis de l'arachide et du maïs une première fois pour éviter une décade sèche début juin mais finissent par semer en juillet même si la prévision annonce à nouveau une sécheresse car (i) ils savent que plus on avance dans la saison plus la probabilité d'avoir de tels événements est faible et (ii) ils n'ont pas le choix et ont une date butoir de semis pour que la récolte ne soit pas nulle.

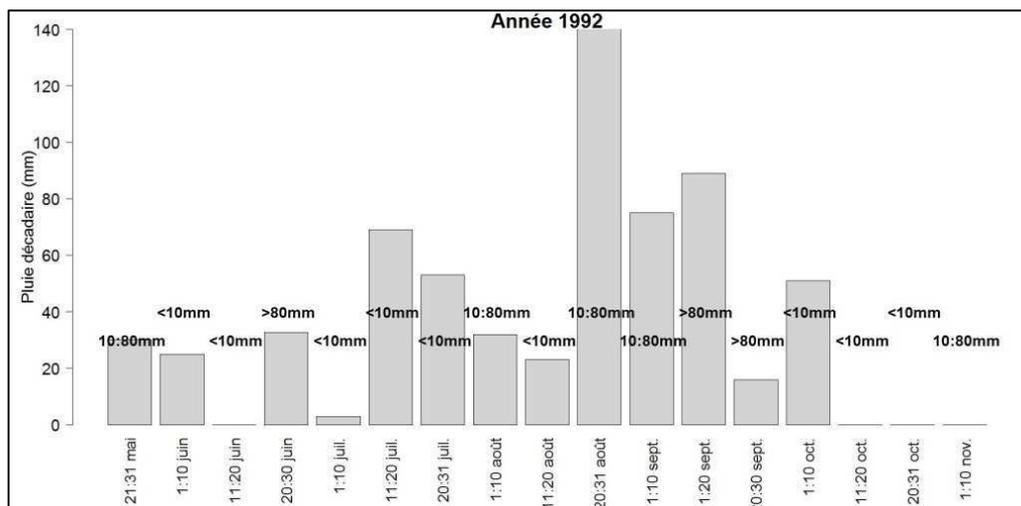


Figure 67: profil pluviométrique de l'année 1992 avec la prévision décadaire donnée aux participants (en gras sur deux lignes)

Les tests de significativité indiquent également un changement pour l'arachide de Bacfassagal en 1960 et le mil de Paoskoto en 1979, alors que la différence n'est pas flagrante sur les graphiques. Cela se produit lorsque strictement tous les exploitants sèment au même moment lors

du tour n°1 et que certains d'entre eux changent leurs semis seulement d'une décade au tour n°2. Le cas du mil en 1979 représente la seule configuration dans laquelle la prévision décadaire peut avoir un effet sur le semis de cette culture. En effet, une décade pluvieuse est prévue début juin ce qui pousse certains exploitants qui sèment traditionnellement durant cette décade à semer de façon plus précoce fin mai. Ainsi, ils espèrent bénéficier des pluies de début juin, afin de ne pas perdre d'eau. Notons que l'on retrouve cette réaction en 1960 à Bacfassagal (mais pas de façon significative) chez certains exploitants.

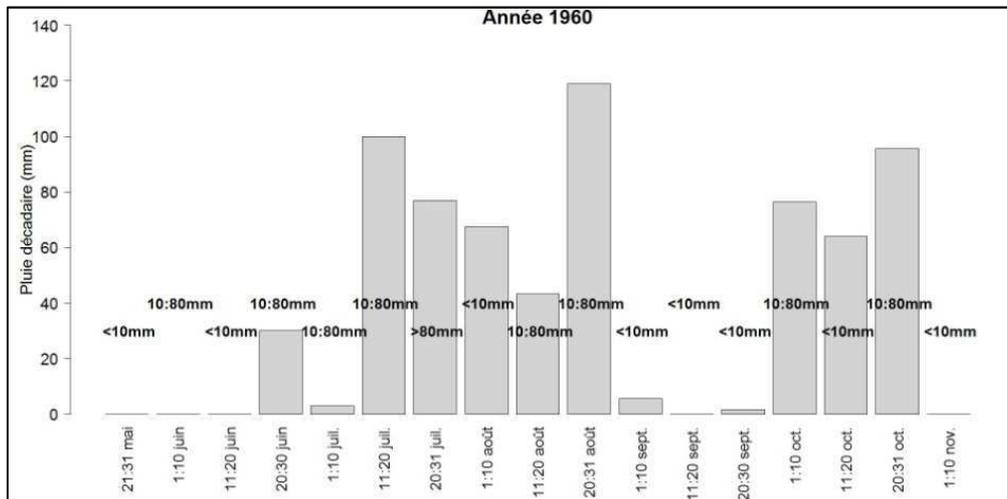


Figure 68: profil pluviométrique de l'année 1960 avec la prévision décadaire donnée aux participants (en gras sur deux lignes)

Les autres schémas de prévision au moment du semis font moins ressortir de changements dans les pratiques culturales. Par exemple, après début juin, si une décade pluvieuse est prévue à la suite d'une décade sèche, cela n'influe pas sur la date de semis. En effet, on a vu que le semis du mil était toujours précoce et que celui de l'arachide et du maïs était réalisé durant des décades pluvieuses. Cependant, une prévision décadaire de ce type peut permettre aux exploitants de se préparer pour le semis dix jours plus tard.

Finalement, on résume dans le Tableau 30 les cas où les prévisions décadaires peuvent influencer sur le semis. Nous citons ici uniquement les cas qu'on a pu observer sur plusieurs participants durant ces ateliers: cela ne signifie pas que ce sont les seuls.

Culture	Moment dans l'hivernage	Configuration pluie/prévision	Effet
mil	Fin mai/début juin	Prévision d'une décade pluvieuse après une décade sèche	Semis plus précoce (1 décade), pour profiter de la pluie.
maïs	De début juin à fin juillet	Prévision d'une décade sèche après une décade pluvieuse propice au semis	Semis reporté, pour éviter la sécheresse
maïs	Début juin	Prévision d'une décade très humide après une décade pluvieuse propice au semis	Semis reporté (1 décade) pour éviter la destruction
arachide	De début juin à fin juillet	Prévision d'une décade sèche après une décade pluvieuse propice au semis	Semis reporté, pour éviter la sécheresse

Tableau 30: résumé des conditions pour lesquelles la prévision est utile au moment du semis, pour les trois principales cultures. Observations fondées sur les feuilles de jeu.

- Impact sur la date de récolte

Si on nous a décrit dans les discussions orales le grand intérêt des prévisions dans le cas de la récolte, les explications données par les agriculteurs ne sont pas toujours en accord avec les fiches de jeu (Figure 69 et Figure 70).

Par exemple, en 1960 à Bacfassagal, plusieurs exploitants ont retardé leur date de récolte, ce qui les a amenés à récolter sous la pluie début octobre alors que cette pluie avait été prévue fin septembre (une décade sèche). On retrouve quasiment la même configuration à Paoskoto en 1979 pour les trois cultures et en 1977 pour l'arachide et le mil: les agriculteurs récoltent de manière significativement plus tardive. Les deux années, plusieurs d'entre eux ont ainsi déplacé leur récolte de début octobre à milieu octobre en réaction à la prévision d'une décade pluvieuse (voir le profil des années, Figure 64 et Figure 66).

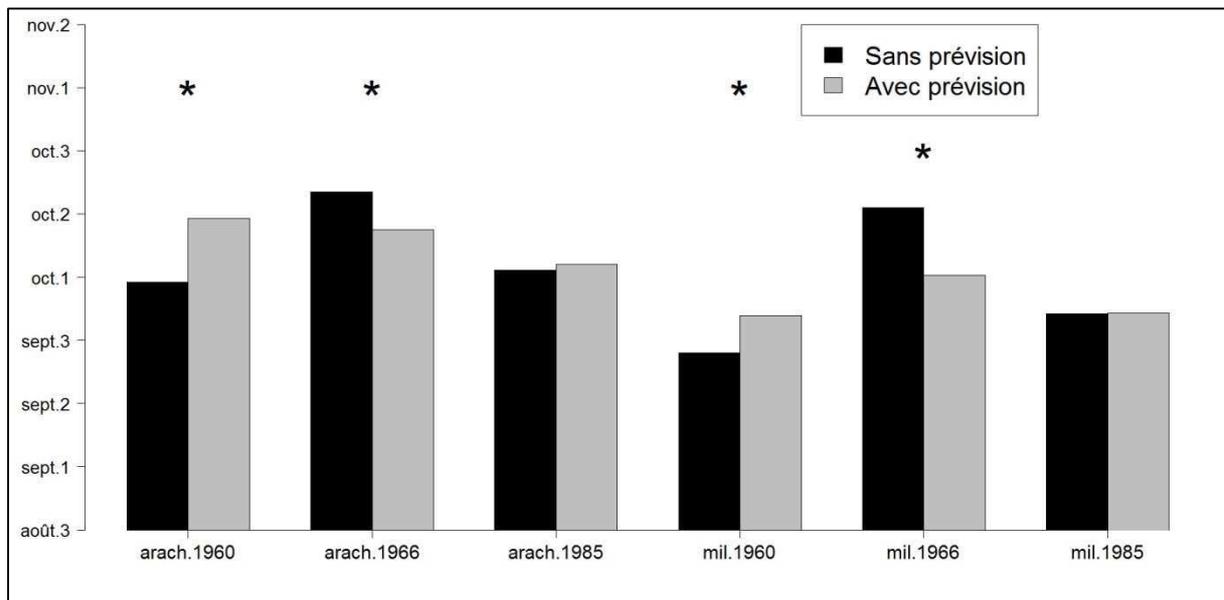


Figure 69: évolution de la date de récolte moyenne en réaction aux prévisions, à Bacfassagal, pour les deux principales cultures. Les différences statistiquement significatives à 5% sont indiquées par une étoile.

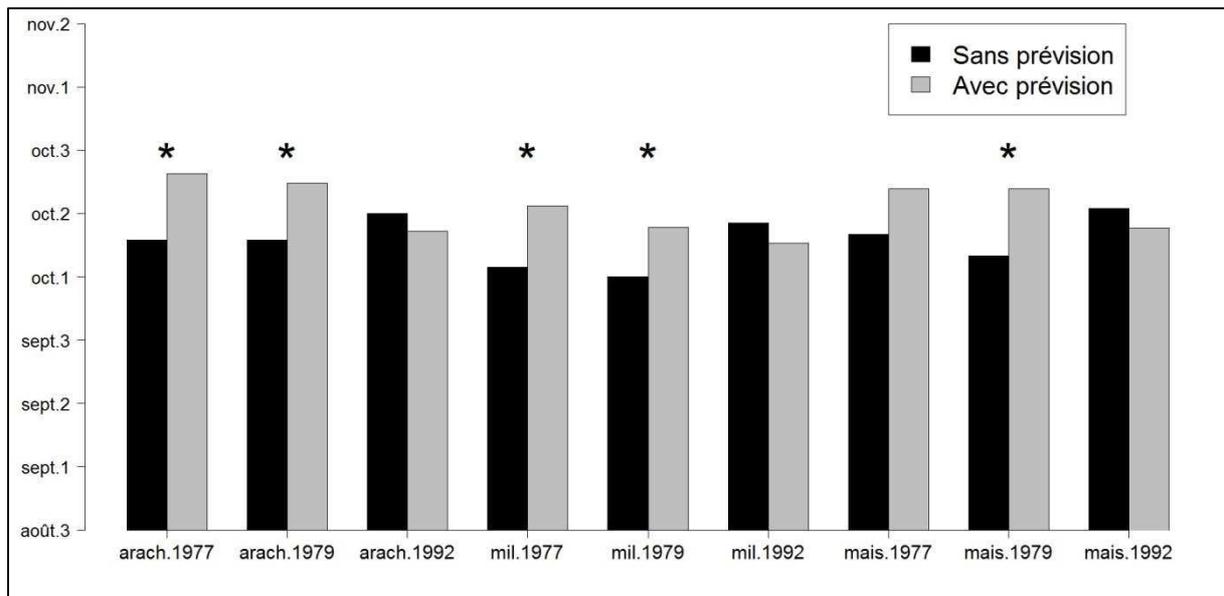


Figure 70: évolution de la date de récolte moyenne en réaction aux prévisions, à Paoskoto, pour les trois principales cultures. Les différences statistiquement significatives à 5% sont indiquées par une étoile.

Cependant, une récolte plus précoce est également possible comme à Bacfassagal en 1966. Certains, qui récoltaient lors d'une décade sèche fin octobre le font au tour n°2 lors des pluies importantes fin septembre/début octobre. Cela paraît également en décalage avec les discussions puisque les agriculteurs nous ont précisé qu'il ne fallait pas récolter *pendant* les pluies. Cependant, il est probable qu'ils voulaient plutôt nous expliquer que les pluies peu avant la récolte, *i.e.* lorsque les cultures sont arrivées à maturation, sont mauvaises pour les cultures. En effet, celles-ci peuvent être attaquées par divers ravageurs et moisissures qui peuvent entraîner des pertes importantes. De plus, les variétés d'arachide de Bacfassagal n'ont pas de capacité de dormance, ce qui signifie que des pluies tardives peuvent faire germer les toutes nouvelles graines si le sol est trop humide en fin de saison (Ntare *et al.* (sans date)). Avec cette interprétation, le comportement des participants de Bacfassagal en 1966 est plus clair: sachant grâce aux prévisions décadaires que les pluies pouvaient continuer, ils ont récolté au plus tôt pour éviter les pertes dues à l'excès d'eau.

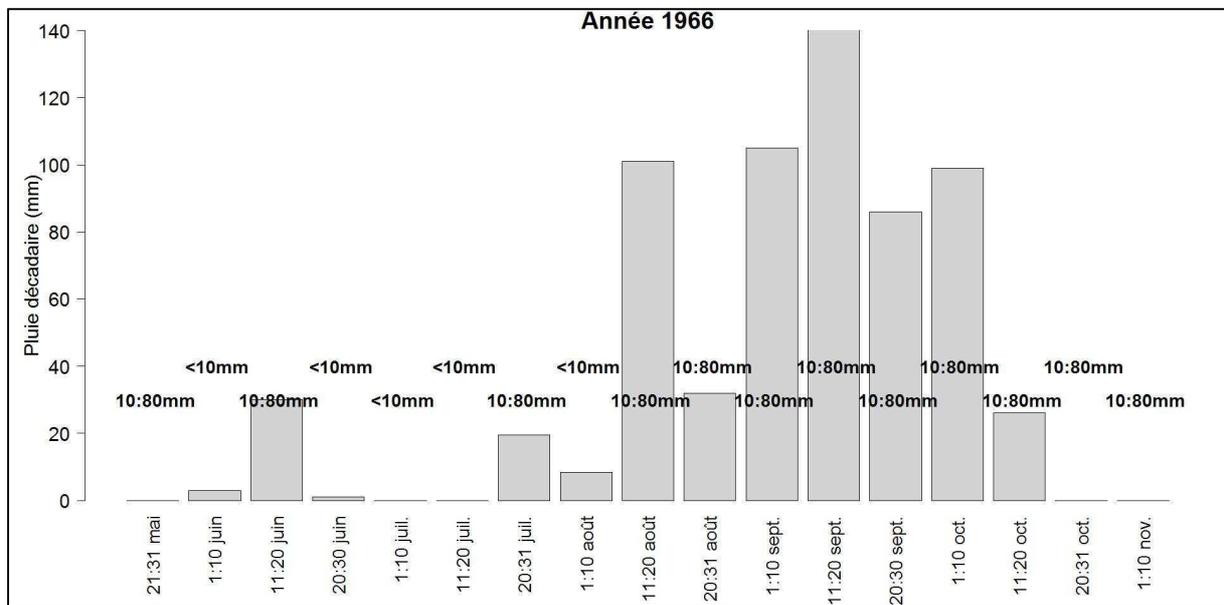


Figure 71: profil pluviométrique de l'année 1960 avec la prévision décadaire donnée aux participants (en gras sur deux lignes)

L'étude des feuilles de jeu nous montre donc que l'utilisation de la prévision décadaire au moment de la récolte est plus complexe que ce qui nous a été décrit lors des discussions (Figure 72). Premièrement, il ne s'agit pas seulement d'éviter la pluie pendant la récolte mais, globalement, quand les cultures arrivent à maturation, pour éviter des pertes importantes (ravageurs, germination précoce). Deuxièmement, pour plusieurs années, les participants ont retardé la récolte afin d'attendre la pluie. Cela peut se comprendre si les cultures étaient récoltées au tour n°1 de façon trop précoce: les participants veulent ainsi bénéficier de la pluie annoncée. D'autres explications sont plausibles pour expliquer ce comportement: (i) il y a eu une mauvaise utilisation des fiches de jeu qui ne permettent pas de bien représenter la décision des exploitants (ii) la catégorie de pluie [10:80mm] n'est finalement pas considérée comme assez importante pour gêner les récoltes, (iii) les exploitants supposent que la prévision se trompe et que lorsqu'elle annonce [10; 80mm] cela a une chance d'être [0;10mm], (iv) ils n'ont pas du tout suivi la prévision et ont changé par rapport au tour initial pour des raisons extérieures, on peut notamment penser à un changement d'attitude entre les tours n°1 et n°2 qui ne se sont pas déroulés le même jour.

Ainsi, on voit que les prévisions décadaires font bien changer les dates de récolte, mais d'autres recherches dans ce sens devront être menées pour comprendre parfaitement toutes les réactions.

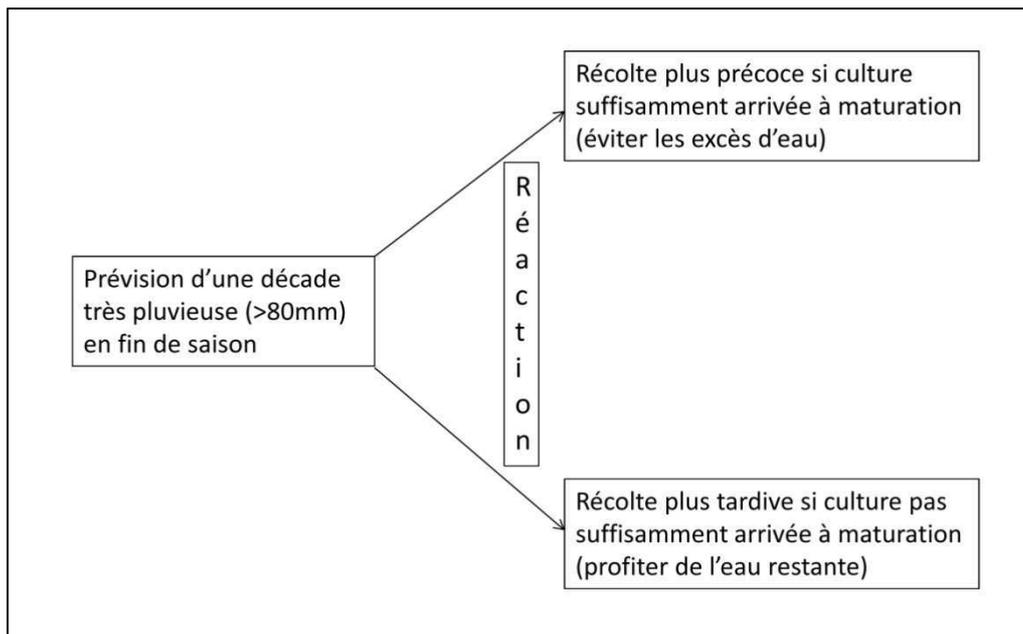


Figure 72: schématisation de la réaction potentielle à la prévision d'une décade très pluvieuse en fin de saison

- Impact sur les autres actions culturelles

En ce qui concerne les autres actions culturelles, un effet de la prévision décadaire sur l'épandage des produits phytosanitaires et des engrais n'est pas clairement visible ici. Quant au sarclage, nous avons essayé de repérer les changements de pratiques décrits lors des discussions en sélectionnant certaines décades intéressantes et en regardant le pourcentage de parcelles sarclées, avec et sans prévision. Les décades "intéressantes" sont en général celles qui précèdent une décade prévue par la météo comme très pluvieuse. Conformément aux discussions avec les paysans, on peut s'attendre à une augmentation du taux de sarclage. Notons que le code couleur du sarclage a parfois été mélangé avec le labour : il a donc fallu faire parfois une interprétation.

Les résultats sont donnés dans le Tableau 31, avec en grisé les cas où le taux de sarclage (*i.e.* nombre de parcelles sarclées/nombre total de parcelles) augmente de plus de 10% avec la prévision. Il est assez visible que l'augmentation du sarclage n'est pas systématique, mais a lieu tout de même sur 8 des 15 cas sélectionnés. Les décades concernées sont plutôt sèches, aux alentours de la fin juillet et donc suivies d'une prévision de fortes pluies. Comme on nous l'a expliqué pendant les discussions, cela permet d'accéder plus facilement aux champs et d'éviter que les plantes parasites prolifèrent avec le début de la pluie. De plus, selon Lamachere (1991), le sarclage permet d'augmenter de façon importante l'infiltration des pluies dans le sol en diminuant le ruissellement. Un sarclage précoce apparaît donc aussi comme une méthode pour maximiser l'apport d'eau aux cultures par infiltration. Ainsi, on voit que si on ne peut confirmer de façon certaine les résultats des discussions, il existe des éléments allant clairement dans le même sens.

Année	Décade	Taux de sarclage, tour n°1	Taux de sarclage, tour n°2	Village	Pluie (mm)	Décade suivante
1960	5	79	84	bacfassagal	3	10:80mm
1966	2	0	0	bacfassagal	3	10:80mm
1966	6	0	35	bacfassagal	0	10:80mm
1966	8	68	67	bacfassagal	8.3	10:80mm
1985	3	0	0	bacfassagal	0	>80mm
1985	8	81	100	bacfassagal	35	>80mm
1977	6	19	22	paoskoto	9.5	>80mm
1977	8	24	50	paoskoto	4.5	>80mm
1977	10	24	42	paoskoto	34.5	>80mm
1979	5	45	62	paoskoto	69.5	>80mm
1979	7	38	52	paoskoto	97.5	>80mm
1979	8	40	38	paoskoto	14.5	>80mm
1979	11	5	2	paoskoto	30	>80mm
1992	3	23	46	paoskoto	0	>80mm
1992	11	0	10	paoskoto	75	>80mm

Tableau 31: taux de sarclage (100%= tous les paysans sarclent, sur toutes les parcelles) sur différentes décades, avec (tour n°2) ou sans (tour n°1) la prévision de la décade suivante.

3.3.3 Bilan sur les prévisions décadaires

En résumé, ces ateliers ont montré que la prévision décadaire pouvait modifier dans certaines configurations le calendrier culturel des agriculteurs de Paoskoto et Bacfassagal (voir Tableau 32). Ces prévisions sont utiles pour les paysans afin d'ajuster:

- La date de semis: cela permet d'éviter les décades sèches juste après le semis pour le maïs et l'arachide et de semer (à sec) le mil plus tôt que prévu pour bénéficier d'une pluie annoncée. La prévision peut permettre aussi de retarder le semis (maïs) pour éviter une grosse pluie juste après le semis. Globalement, ce sont surtout l'arachide et le maïs qui bénéficient des prévisions décadaires au moment du semis.

- La date de récolte: si cela ressort plus ou moins bien dans les feuilles de jeu, les exploitants ont souligné oralement l'importance de la prévision décadaire au moment de la récolte. Ils peuvent en effet l'utiliser pour anticiper l'arrivée d'une pluie et hâter la récolte avant le développement de moisissures et l'arrivée de ravageurs. Ils minimisent ainsi les pertes en fin de cycle culturel.

- Le sarclage: si, au moment où il faut sarcler, la décade suivante est annoncée comme très pluvieuse, les agriculteurs vont hâter le sarclage pour éviter la prolifération des adventices avec la pluie. Cela permet également une meilleure infiltration des précipitations.

Les prévisions décadaires sont donc efficaces dans des conditions assez précises. Elles apportent en outre des informations au semis et à la récolte qui sont des alternatives intéressantes à la prévision saisonnière de la date de début et de fin d'hivernage. Ces deux informations fréquemment demandées par les agriculteurs (Ingram *et al.* (2002)) peuvent engendrer des gains importants (Roudier *et al.* (2011b)). Notons cependant que la prévision décadaire donne moins d'information qu'une prévision saisonnière du démarrage des pluies (telle que définie par Sivakumar (1988)). Sa portée temporelle n'est en effet que de 10 jours. Ainsi, les paysans ne seraient pas avertis au moment de semer d'une sécheresse survenant la deuxième décade après le semis alors que celle-ci peut avoir un effet létal.

Activité	Nombre de changements à Paoskoto	Nombre de changements à Bacfassagal	Commentaires
Semis	2/9	2/6	Le total (6 ou 9) représente le nombre de cultures principales (2 ou 3) * le nombre d'années (3). On indique les différences dans la date de semis moyenne (sur le panel d'agriculteurs) statistiquement significatives à 5%.
Récolte	5/9	4/6	Le total (6 ou 9) représente le nombre de cultures principales (2 ou 3) * le nombre d'années (3). On indique les différences dans la date de récolte moyenne (sur le panel d'agriculteurs) statistiquement significatives à 5%.
Sarclobinage	6/9	2/6	Le total (6 ou 9) représente le nombre de décades sélectionnées pour étudier l'effet du sarclobinage. On dénombre ici le nombre de cas où la différence de taux de sarclobinage entre les deux tours est supérieure à 10%.

Tableau 32: bilan des changements de pratiques significatifs (voir commentaires) entre les deux tours

3.4 Utilisation des prévisions scientifiques saisonnières

3.4.1 Résultats des discussions

La prévision saisonnière semble quant à elle avoir été moins utilisée que la prévision décadaire, surtout à Bacfassagal. Dans ce village, si les exploitants ont déclaré que cette information était intéressante, peu ont dit avoir changé dans les faits leurs pratiques (parcelles ou variétés). L'un d'entre eux explique cela en disant "qu'il y a des limites à ce qui est faisable", ce qui signifie qu'ils n'ont pas toujours la capacité de réaction à une prévision saisonnière, où que les choix sont trop risqués. Cependant, un autre paysan a reconnu qu'il aurait dû semer du mil sanio (cycle long) suite à la prévision saisonnière humide. Il explique ce choix de ne pas changer seulement par "c'est comme ça". Les agriculteurs de Bacfassagal ont plutôt trouvé cette prévision peu pertinente, l'une d'entre elle (hors panel) allant jusqu'à dire qu'il fallait vraiment être "paresseux pour écouter la prévision et attendre sans rien faire". Un autre a cependant ajouté que la prévision de l'année sèche lui a permis d'exclure la pastèque de ses cultures. Une tierce personne a précisé que durant l'année où ils ont dû ressemer le mil en août, la prévision d'une bonne année l'a encouragée.

A Paoskoto, la prévision saisonnière a reçu un meilleur accueil lors des discussions. En effet, dans ce village les possibilités de réaction à une telle prévision sont plus importantes car les cultivateurs disposent, notamment via la coopérative, de plus nombreux cultivars d'arachide. La plus forte pluviométrie permet également de faire plus facilement du maïs voire même du riz pluvial. Ainsi, plusieurs agriculteurs ont dit choisir leurs variétés d'arachide en fonction de la prévision saisonnière, en jouant sur les longueurs de cycle. Un autre exploitant (hors panel) qui suivait le jeu a également déclaré qu'avec la prévision d'année humide, il aurait semé du riz pluvial.

3.4.2 Résultats issus des feuilles de jeu

- Changement de parcelles

Comme pour les prévisions décadaires, la retranscription des changements de pratiques à travers les feuilles de jeu n'est pas toujours facile à exploiter. Pour ce qui est des parcelles utilisées (champs de case/brousse et sableux/argileux), il n'y a la plupart du temps aucun changement ou alors il est difficile de se prononcer. En effet, dans plusieurs cas les informations n'ont pas été renseignées correctement.

- Utilisation de l'engrais et des pesticides

L'étude théorique du chapitre précédent a montré que les taux d'épandage d'engrais pouvaient varier avec les prévisions saisonnières. Ainsi, et même si on ne nous a pas précisé un changement d'usage de ce type dans les discussions orales, on regarde l'évolution du taux d'utilisation des engrais chimiques et des produits phytosanitaires entre les deux tours. A Paoskoto tout d'abord (Tableau 33), on remarque que les pratiques changent relativement peu: il n'y a jamais plus de 10% d'écart entre les deux tours. Une différence de 10% est notable en 1977 mais comme la prévision pour cette année est "forte incertitude, peut-être normale", il est probable que la différence ne provienne pas de la prévision saisonnière. De manière générale, on a vu que le code couleur à Paoskoto avait été mal calibré, ce qui a entraîné des confusions, notamment sur les produits phytosanitaires et les engrais. Il ne semble donc pas possible de tirer des informations dans ce village. En revanche, les résultats de Bacfassagal, où le code couleur a été simplifié, sont plus tranchés et suivent une certaine logique. Ainsi, pour les années 1960 et 1966 (prévision humide) le taux d'engrais et de produits phytosanitaires augmente de plus de 10 % alors que pour l'année 1985 (prévision sèche avec forte probabilité), le taux d'engrais baisse de 25%. Ces résultats semblent recouper ceux du chapitre précédent où on avait remarqué une plus forte utilisation des engrais en années humides. On ne peut cependant pas affirmer avec certitude que cela est dû à la prévision saisonnière puisque personne n'a évoqué une telle réaction dans les discussions.

	1977 (forte incertitude)		1979 (humide)		1992 (normale à sèche)		1996 (humide à normale)	
Tour n°	1	2	1	2	1	2	1	2
Engrais	41	51	53	48	46	52	46	44
Phyto	20	25	38	34	18	28	26	33

Tableau 33: taux d'utilisation (%) des engrais et des produits phytosanitaires par année et pour le tour sans prévision (n°1) et avec prévision (n°2), à Paoskoto. Les différences supérieures à 10% entre les deux tours sont soulignées.

	1960 (humide à normale)		1966 (humide forte précision)		1985 (sèche forte précision)	
Tour n°	1	2	1	2	1	2
Engrais	<u>23</u>	<u>35</u>	<u>16</u>	<u>30</u>	<u>47</u>	<u>22</u>
Phyto	<u>25</u>	<u>36</u>	34	42	27	21

Tableau 34: taux d'utilisation (%) des engrais et des produits phytosanitaires par année et pour le tour sans prévision (n°1) et avec prévision (n°2), à Bacfassagal. Les différences supérieures à 10% entre les deux tours sont soulignées.

- Changement de cultures

Pour ce qui est des types de cultures, peu de changements sont notables dans les deux villages, comme le montrent la Figure 73 et la Figure 74. On remarque tout de même à Paoskoto une variation entre la part respective du maïs et de l'arachide entre les deux tours. Mais cela semble en fait imputable au déroulement du jeu: en effet, quelle que soit la prévision, il y a une baisse du taux d'arachide et une augmentation du mil (Tableau 35 et

Tableau 36). Les participants ont très probablement modifié leurs champs le deuxième jour suite à des discussions entre eux. En revanche, on relève à Bacfassagal de petits changements qui semblent utiliser la prévision: le taux de niébé augmente (diminue) en effet légèrement quand l'hivernage est supposé être sec (humide), au profit de l'arachide. La différence n'est pas numériquement importante, car comme on l'a vu, le scepticisme vis-à-vis de cette prévision est assez important à Bacfassagal. De plus, tout le monde ne sème pas habituellement du niébé.

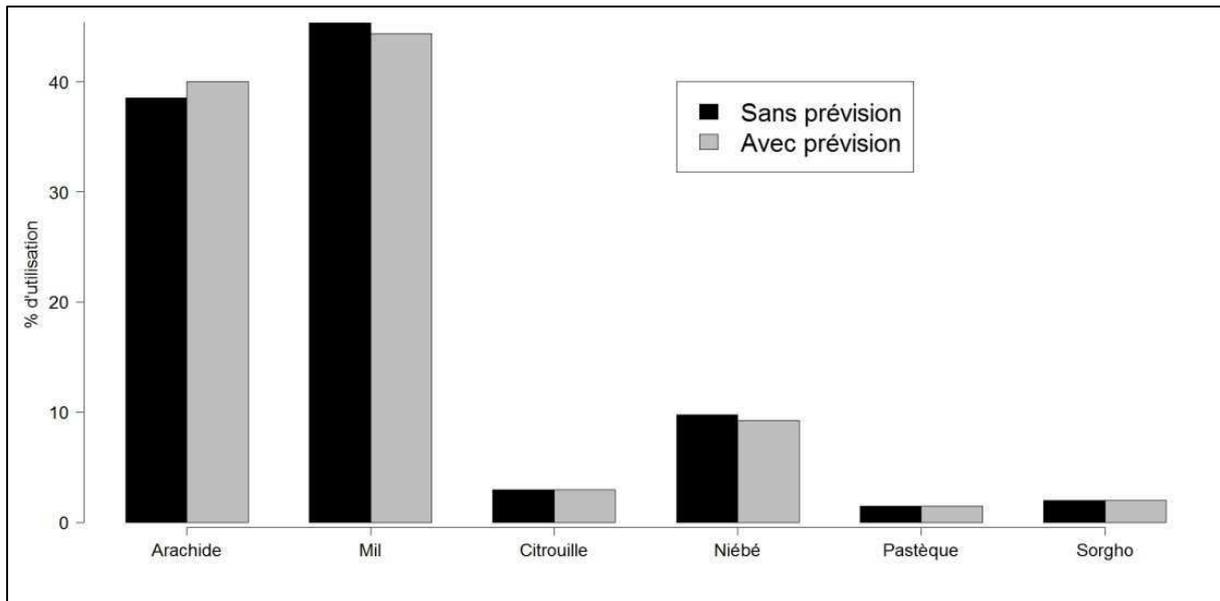


Figure 73: évolution du taux d'utilisation moyen (%) de chaque culture en réaction aux prévisions, à Bacfassagal, sur trois ans

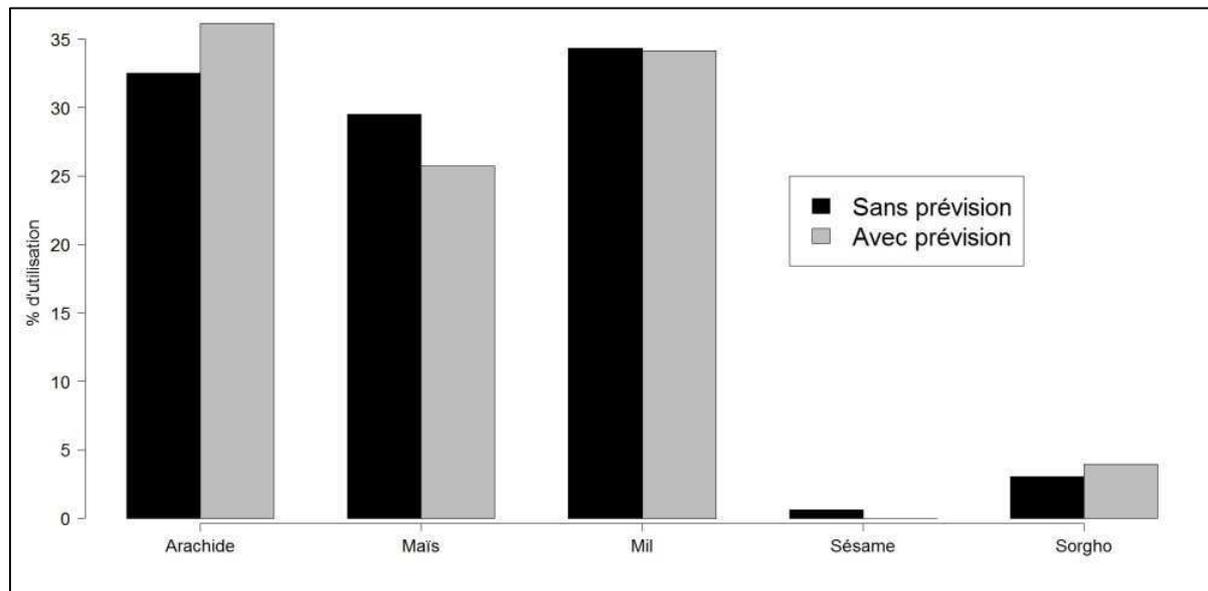


Figure 74: évolution du taux d'utilisation moyen (%) de chaque culture en réaction aux prévisions, à Paoskoto, sur quatre ans

		Taux d'utilisation (%) des cultures à Paoskoto							
		1977		1979		1992		1996	
Cultures	Prévision	Forte incertitude		humide		Normale à sèche		humide	
	Tour n°	1	2	1	2	1	2	1	2
	arachide	32	36	31	37	31	36	35	36
	maïs	32	26	31	25	31	26	25	26
	mil	35	34	33	35	33	34	35	34
	sesame	0	0	0	0	3	0	0	0
	sorgho	0	4	5	4	3	4	4	4

Tableau 35: évolution du taux d'utilisation moyen (%) de chaque culture en réaction aux prévisions, à Paoskoto, année par année

		Taux d'utilisation (%) des cultures à Bacfassagal					
		1960		1966		1985	
		Prévision Humide à normale		Humide		Sèche	
Tour n°		1	2	1	2	1	2
Cultures	arachide	38	40	38	41	40	39
	mil	46	46	45	43	46	43
	nadio	3	3	3	3	3	3
	niebe	10	7	10	9	9	12
	pasteque	1	1	1	1	1	1
	sorgho	1	1	3	3	1	1

Tableau 36: évolution du taux d'utilisation moyen (%) de chaque culture en réaction aux prévisions, à Bacfassagal, année par année

- Changement de variétés : le cas de l'arachide

Il n'y a, à Bacfassagal, aucun changement de variétés d'arachide en fonction de la prévision (Tableau 37). En revanche, ce n'est pas le cas de Paoskoto où le changement variétal est le principal mode de réaction à la prévision saisonnière. Par exemple, il est visible (Tableau 38) que lors des années 1979 et 1996, qui sont annoncées humides par la prévision, les exploitants ont cultivé de façon plus importante les cultivars 28-206 et GH 119, qui ont des cycles plus longs et une moindre résistance à la sécheresse. Si cette tendance est plus marquée en 1979 qu'en 1996, c'est probablement pour deux raisons: (i) l'année 1979 a un début précoce à l'inverse de 1996 ce qui confirme pour les exploitants la possibilité d'une année humide et (ii) l'année 1996 est la dernière jouée, les agriculteurs ont donc eu le temps d'assimiler le fait que la prévision puisse se tromper. De plus, on peut également souligner qu'en 1977 et 1992 où la prévision n'est pas tranchée, il n'y a pas de tendance marquée pour les changements de variétés. On peut néanmoins remarquer en 1992 une petite progression des variétés adaptée aux années humides alors que la prévision tend plutôt vers un hivernage sec. Il est probable que, voyant que la prévision saisonnière n'était pas précise, les agriculteurs ont anticipé une année humide car le début de celle-ci était assez précoce.

D'autre part, durant les années comme 1979 et 1996 qui ont entraîné des modifications, il est intéressant de voir comment les participants mettent en place leurs changements cultureux. Si ils modifient généralement leur unique parcelle d'arachide en changeant la variété, on a observé dans certains cas un comportement différent pour ceux qui ont plusieurs parcelles d'arachide. Ils en utilisent en effet une sur laquelle ils gardent la même variété et une autre sur laquelle ils effectuent un changement pour suivre la prévision. Cette pratique tend ainsi à minimiser le risque induit par l'erreur potentielle de la prévision et rejoint la notion d'aversion au risque abordée dans le chapitre précédent.

Prévision	1960		1966		1985	
	Humide à normale		Humide		Sèche	
Tour n°	1	2	1	2	1	2
Fouré	47	43	47	50	43	47
Fouré diaobé	53	57	53	50	57	53

Tableau 37: taux d'utilisation (%) des différentes variétés d'arachide de Bacfassagal

		Taux d'utilisation (%) des variétés d'arachide à Paoskoto							
		1977		1979		1992		1996	
Variétés	Prévision	Forte incertitude		humide		Normale à sèche		humide	
	Tour n°	1	2	1	2	1	2	1	2
	28_206	17	11	17	47	17	22	11	17
	GH_119	0	0	0	16	0	6	6	17
	73_33	50	61	50	32	50	56	56	56
	F 11	25	22	25	5	25	6	22	6
	55_437	8	6	8	0	8	11	6	6

Tableau 38 : taux d'utilisation (%) des différentes variétés d'arachide de Paoskoto. Les couleurs des variétés représentent leur aptitude pour les années sèches (jaune clair et foncé) et humides (vert clair et foncé)

3.5 Impact sur les rendements

3.5.1 Notation par les participants

Un des objectifs de ces ateliers est d'évaluer l'impact des prévisions sur le rendement des cultures, et donc de voir si la prévision a globalement un impact positif ou pas. Cependant, la notation des rendements n'a pas été sans problème. En effet, l'évaluation d'un rendement est très soumise aux commentaires faits dans l'assistance au moment de la notation. On a ainsi vu des joueurs à Paoskoto changer leur évaluation car quelqu'un avait déclaré que l'année n'était "pas si bonne que ça". Ainsi, nous avons pris plus de temps à Bacfassagal pour expliquer le système de notation. Par exemple, nous avons insisté sur le fait que la notation était personnelle et sur le caractère exceptionnel des notes 1 et 5. Il semble que cela ait eu un impact puisqu'on note dans le deuxième village une dispersion plus faible des notes. Ainsi, il paraît prudent de ne commenter que les notations de rendements de Bacfassagal. De plus, aucune des différences de note de Paoskoto n'est statistiquement significative (Figure 76) et si des résultats cohérents sont observables (augmentation du rendement de l'arachide en 1979) d'autres le sont moins (baisse du mil pour cette même année). Notons que si on considère la note moyenne des rendements avec et sans prévision pour chacun des deux villages, elle est très légèrement supérieure au tour n°2, mais cette différence n'est pas significative à 5%.

A Bacfassagal, on note un changement statistiquement significatif de rendement (Figure 75) dû à la prévision pour :

- l'arachide en 1966 (augmentation du rendement): cette tendance peut s'expliquer par la modification de la récolte en réaction à la prévision décadaire. On a en effet vu dans la section 3.3.2 que ce changement était significatif et permettait d'éviter des pertes de fin de saison. Cela pourrait aussi expliquer la meilleure notation (mais non significative) des rendements du mil cette même année puisque la même tendance a été observée à la récolte.

- l'arachide en 1985 (baisse): on a souligné dans la section 3.3.2 que les participants avaient significativement décalé leur semis pour éviter la prévision (erronée) d'une décade sèche. Ils ont donc semé plus tard ce qui a été préjudiciable car l'hivernage a été assez court cette année-là.

Quant à l'impact de la prévision saisonnière sur le rendement, il est ici difficile à évaluer puisqu'on a vu que la notation de Paoskoto pouvait difficilement être exploitable en l'état et que les participants de Bacfassagal utilisaient peu cette information, à part pour l'utilisation des engrais et des pesticides. Les meilleurs rendements en 1966 pourraient ainsi également s'expliquer par l'emploi plus important des engrais pendant une année humide, pratique qui a été induite par la prévision saisonnière d'année humide. Inversement, l'année 1985 avait été prévue sèche, ce qui a entraîné

moins d'utilisation d'intrants et s'est avérée en réalité normale. Cela peut aussi expliquer les moins bons rendements de cette année.

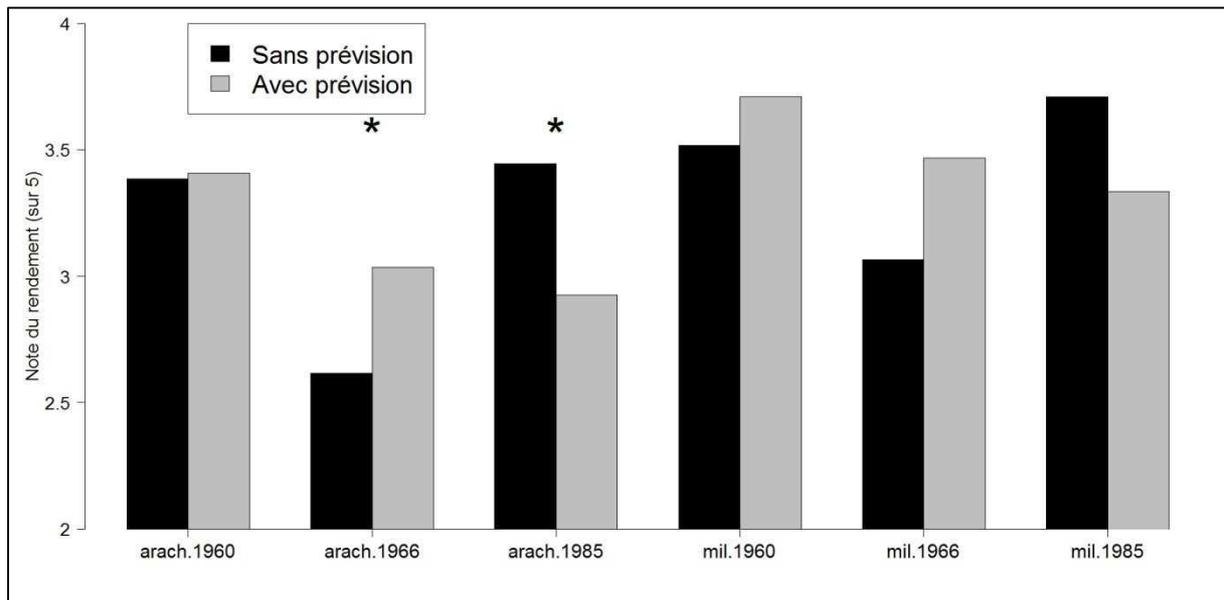


Figure 75: évolution de la notation du rendement (1: exceptionnellement mauvais, 5: exceptionnellement bon) avec la prévision, pour les deux principales cultures à Bacfassagal. Les différences statistiquement significatives à 5% sont indiquées par une étoile.

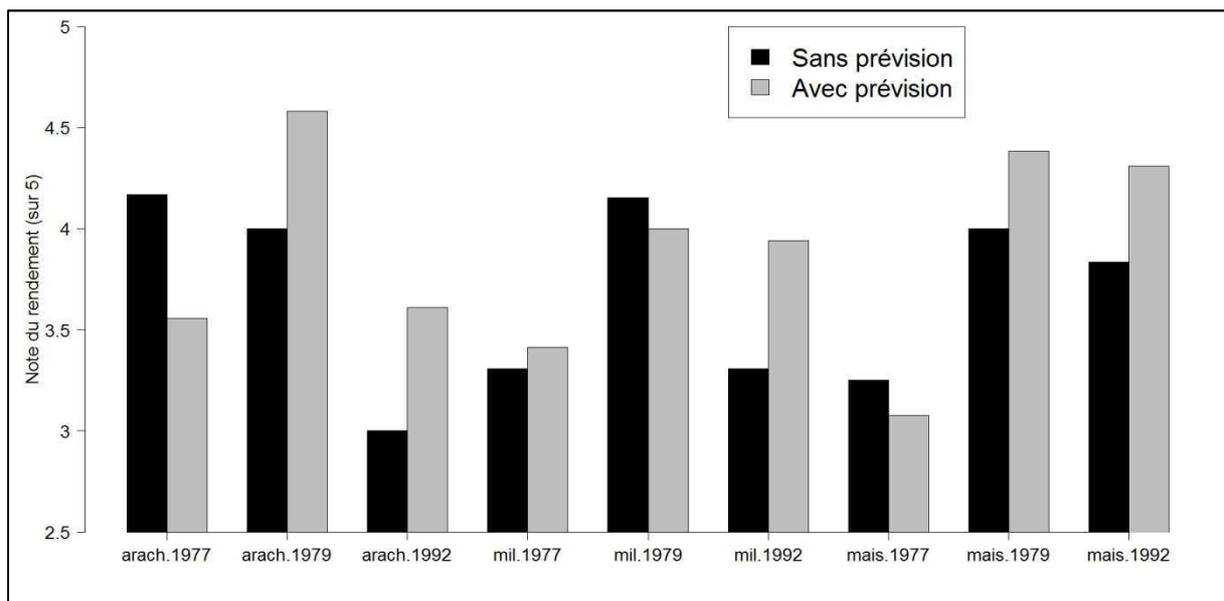


Figure 76: évolution de la notation du rendement (1: exceptionnellement mauvais, 5: exceptionnellement bon) avec la prévision, pour les trois principales cultures à Paoskoto

Finalement, on voit que la notation des rendements peut dans certains cas refléter les changements importants de pratiques culturelles créés par la prévision décadaire. Pour les années sélectionnées à Bacfassagal, la prévision décadaire peut faire baisser ou augmenter le rendement, selon sa pertinence. Soulignons cependant ici que la variabilité interannuelle du rendement diminue, ce qui est un critère de satisfaction pour les exploitants cherchant plus à minimiser ces variations qu'à maximiser leur rendement moyen.

3.5.2 Notation d'expert

On a vu que notamment à Paoskoto, notre système de notation ne semblait pas pertinent. Afin d'avoir un autre avis, nous avons demandé à un expert en agronomie tropicale de noter les rendements en regardant les fiches (et la pluie) de chaque participant. Il ne s'agit nullement ici de substituer cette notation d'expert à la notation des participants mais de donner un autre point de vue et de combler les lacunes du système de notation. De plus, la notation a cette fois eu lieu en comparant deux à deux (pour un même participant et une même année) les fiches avec (tour n°2) et sans prévision (tour n°1). Cela permet de mieux faire ressortir les différences entre les itinéraires.

Cependant, pour des raisons de temps de travail, il est important de noter que nous avons réalisé cette notation d'expert uniquement pour le mil, l'arachide et le maïs et sur un sous-panel comportant 7 participants sur les deux villages. Ces sept participants sont, selon nous, ceux qui n'ont eu aucun problème avec le support de restitution et qui ont rempli la fiche de jeu de la façon la plus complète. Leur choix n'a donc pas été réalisé afin d'orienter les résultats dans un sens ou un autre. Si cela apparaît comme une limite évidente de cette méthode, nous avons réalisé tous les graphiques précédents avec ce sous-panel d'agriculteurs et les tendances globales sont les mêmes à l'exception de l'utilisation des engrais à Bacfassagal: la prévision n'entraîne en effet aucun changement à Bacfassagal avec le panel réduit. Finalement, la notation d'expert se fonde sur les critères suivant: variété (et donc *e.g.* longueur de cycle, capacité de dormance), date de semis, date de récolte, utilisation de fumure, d'engrais, type de sol, et profil pluviométrique de l'année.

- Effet global de la prévision sur les rendements des deux villages

Tout d'abord la notation d'expert montre que les prévisions n'induisent jamais un changement de plus d'une catégorie: la différence de notation est donc comprise entre -1 et +1. Nous avons donc classé les évolutions de notation selon trois classes: positive (la prévision est bénéfique), nulle (pas de changement de rendement) et négative (la prévision est néfaste). La Figure 77 présente les résultats d'évolution des rendements, en considérant les deux villages et les années 1960, 1966, 1977, 1979, 1985 et 1992, afin d'avoir une vue d'ensemble de l'impact des prévisions données. S'il est clair que le *statu quo* domine la plupart du temps (62%), un effet positif est cependant notable dans 31% des cas. De plus, l'utilisation des prévisions entraînent seulement très marginalement (7%) une baisse des rendements. L'effet global est donc plutôt intéressant car ces prévisions permettent un gain bien plus fréquemment qu'une perte. Nous étudions par la suite dans ces trois catégories d'évolution de rendement les changements de pratiques culturelles responsables de la variation du rendement.

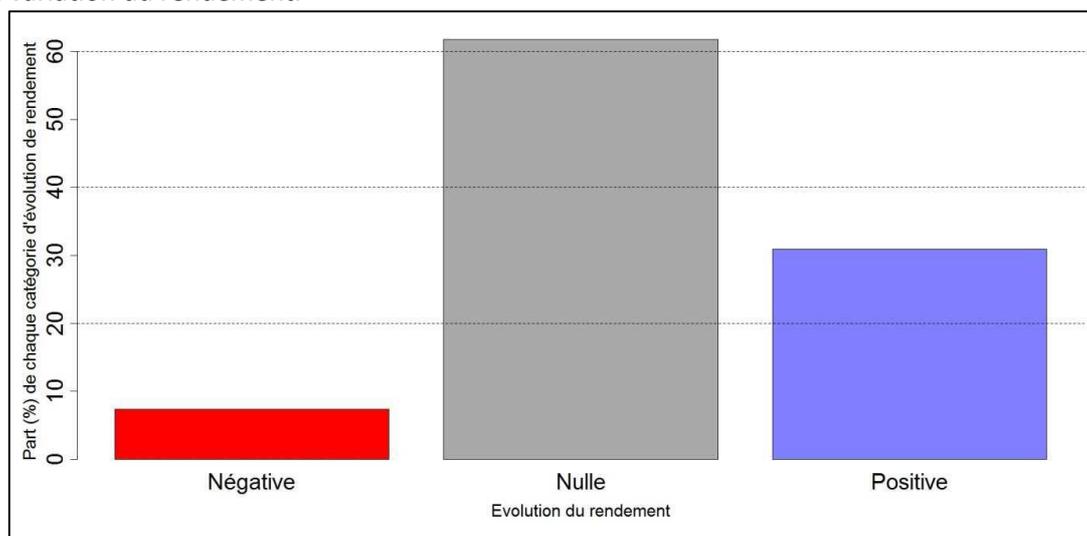


Figure 77: impact des prévisions saisonnières et décennales sur les rendements. Cette figure montre la part relative de chaque type d'évolution de rendement (positive, nulle ou négative) en prenant en compte les deux villages et les années 1960, 1966, 1977, 1979, 1985 et 1992.

- Cause des différences de notation

Sans surprise, les rendements qui ne changent pas avec la prévision (catégorie "effet nul", Figure 78) sont dus majoritairement à une absence de changement dans les pratiques culturales (colonne "RAS"). Les agriculteurs peuvent décider de ne pas changer (i) parce qu'ils n'ont pas confiance dans la prévision, (ii) parce que la prévision ne donne pas une information pertinente (faible précision) ou (iii) parce que la prévision confirme la décision prise au tour n°1. Il y a cependant des cas où la prévision engendre des changements (par exemple de date de semis) mais qui n'ont pas d'influence significative sur le rendement. L'effet négatif de la prévision sur les rendements est clairement dû à un décalage du semis pour suivre la prévision d'une décade sèche (par exemple), alors que celle-ci sera effectivement pluvieuse. On a vu que c'était le cas de l'arachide de Paoskoto en 1985. Enfin l'effet positif des prévisions est dû à une grande diversité de changements dans les pratiques. Le changement le plus courant est un décalage de la date de semis et de fumure: ces deux opérations sont fréquemment réalisées conjointement, mais c'est la date de semis qui détermine la fumure et non l'inverse. Globalement, si on considère les stratégies ayant le changement de date de semis comme élément moteur (*i.e.* semis, semis+fum, semis+fum+NPK, semis+NPK) cela représente 43% des stratégies employées. L'autre grand type de changement possible est l'adaptation de la variété (pouvant s'accompagner d'un changement de date de semis) qui représente 29% des stratégies (variete, variete+NPK et variete+semis). Notons que ce changement est une réponse à la prévisions saisonnière alors que le changement de date de semis est une réaction à la prévision décadaire.

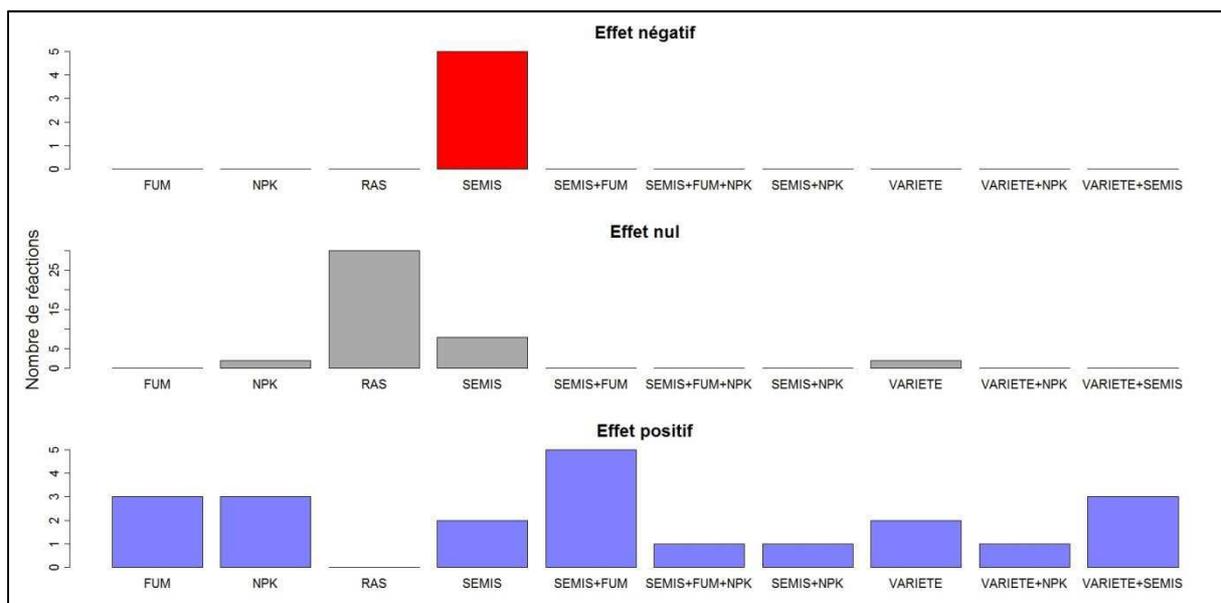


Figure 78: Etude des changements de pratiques culturales (avec la prévision) ayant entraîné les changements de rendements précisés (négatif, nul ou positif). "FUM"=fumure organique, "NPK"=engrais chimique, "RAS"=pas de changement, "SEMIS"=date de semis, "VARIETE"=changement de variété.

- Différences entre les deux villages

On a vu dans les sections précédentes que les deux villages ne semblaient pas avoir le même niveau de réaction aux prévisions. Ainsi, on regarde ici si cela transparaît dans les notations des rendements en comparant les deux villages (Figure 79). Il est tout d'abord clair que les exploitants de Bacfassagal connaissent bien plus fréquemment un effet nul des prévisions sur les rendements (75% vs 55%). De plus, l'utilisation des prévisions à Bacfassagal donne quasiment autant d'effets négatifs que positifs, alors que le positif domine largement à Paoskoto. On peut dès lors se demander pourquoi il y a un meilleur effet des prévisions à Paoskoto.

On pourrait penser que le fort taux d'effet nul à Bacfassagal est dû à une forte proportion de "RAS", mais celui-ci est en fait inférieur au taux de Paoskoto (Figure 80). En revanche, les réponses aux prévisions sont beaucoup moins diversifiées à Bacfassagal. Il n'y a notamment jamais de changement de variété, alors que c'est une pratique courante à Paoskoto, qui se retrouve dans les effets positifs du rendement. Les agriculteurs de Bacfassagal pâtissent donc du fait qu'ils n'utilisent pas une gamme de stratégies assez vaste, notamment le choix variétal. Nous proposons ici l'hypothèse que cela peut être dû à un effet conjoint de la méfiance vis-à-vis de la prévision saisonnière (puisqu'on nous avait signalé son manque d'utilité à Bacfassagal) et à un manque de variétés disponibles. En ce qui concerne l'utilisation d'engrais chimique (NPK), on a vu dans les sections précédentes que c'était une des seules possibilités dont disposent les agriculteurs de Bacfassagal pour réagir effectivement à la prévision saisonnière. Cependant, la Figure 80 indique qu'il n'y a pas d'utilisation de NPK: cette différence vient de l'utilisation d'un sous-panel pour la notation d'expert. Il ne semble pas que cela affecte qualitativement d'autres résultats que le NPK.

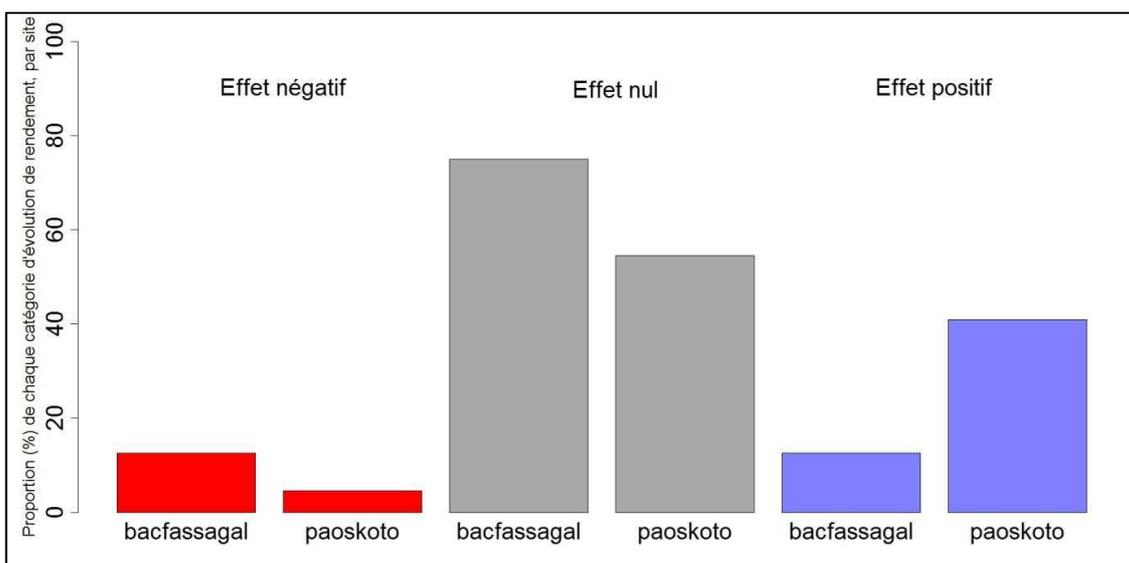


Figure 79: effet des prévisions sur les rendements, selon les villages. L'effet sur les rendements est classé en négatif, nul ou positif.

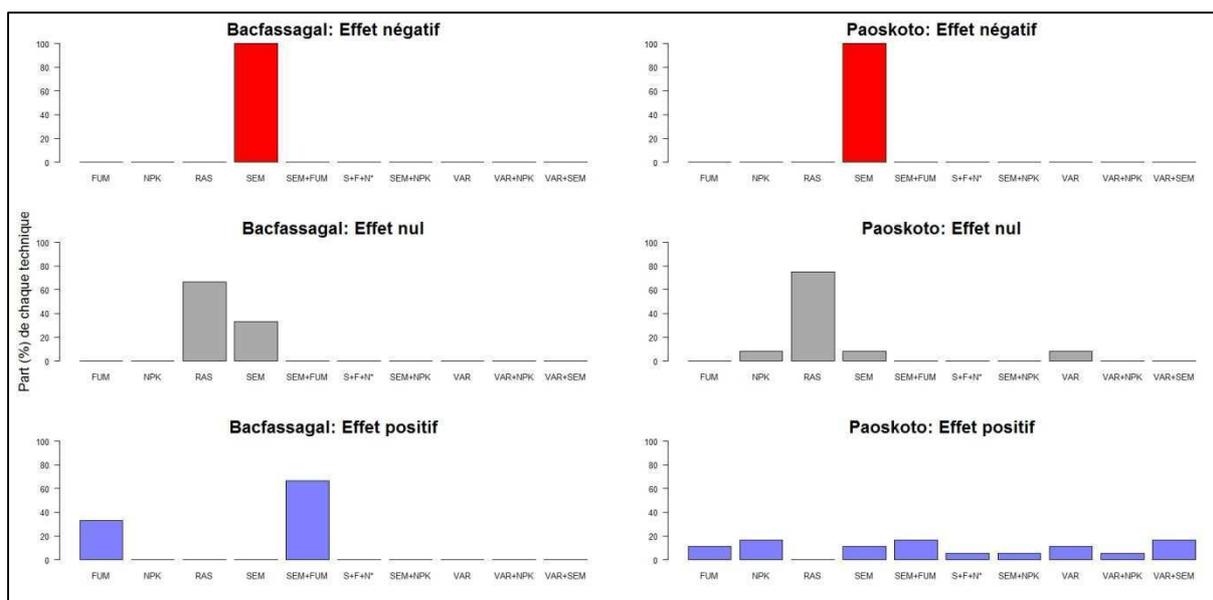


Figure 80: Pour chacun des deux villages, étude des changements de pratiques culturelles (avec la prévision) ayant entraîné les changements de rendements précisés (négatif, nul ou positif). "FUM"=fumure organique, "NPK"=engrais chimique, "RAS"=pas de changement, "SEM"=date de semis, "VAR"=changement de variété, "S+F+N"=Semis, Fumure, NPK.

- Différences selon les années

Enfin, on s'intéresse ici à la différence de rendement selon les années (Figure 81). Tout d'abord, si on compare avec la notation des agriculteurs, on voit que les résultats ne sont jamais radicalement différents: par exemple, 1985 ressort comme une année où les prévisions ont été plutôt néfastes, 1979 et 1992 plutôt positives. Cette notation ne permet cependant pas d'évaluer directement l'efficacité de la prévision saisonnière donnée (Tableau 39), puisque les prévisions décadaires jouent également beaucoup. On a vu en effet que les prévisions saisonnières n'étaient que très peu utilisées à Bacfassagal. Ainsi, on pourrait penser que l'année 1985 connaît un effet négatif à cause de la mauvaise prévision d'une année sèche, mais cela est en fait dû aux erreurs de la prévision décadaire (notamment au moment du semis, voir les sections précédentes). Il est en de même pour les autres années de Bacfassagal et pour l'année 1977, qui a une prévision très peu précise. En revanche, l'effet de la prévision saisonnière apparaît pour les années 1979 et 1992 pour lesquelles on note une tendance plutôt positive, notamment due (en particulier en 1979) à une prévision saisonnière qui se réalise.

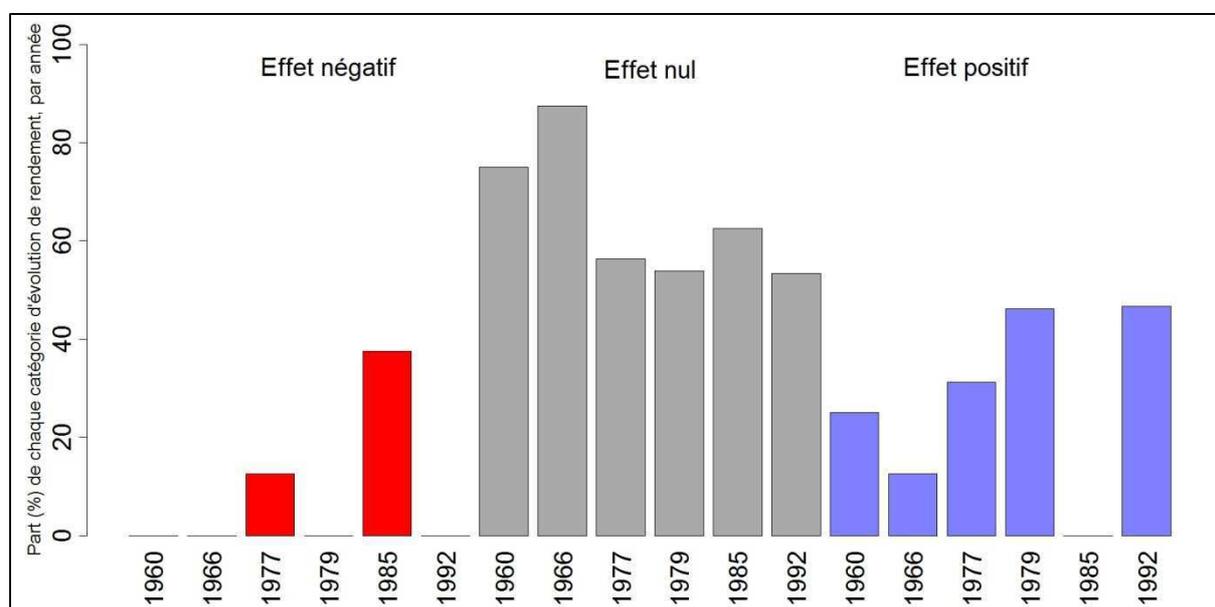


Figure 81: effet des prévisions sur les rendements, suivant les six années sélectionnées. L'effet sur les rendements est classé en négatif, nul ou positif.

Village	Année	Prévision	Observation
Paoskoto	1977	Forte incertitude, peut-être normale	Sèche
	1979	Année humide	Humide
	1992	Année normale à sèche	Sèche
Bacfassagal	1960	Année humide à normale	Normale
	1966	Année humide (avec une bonne confiance)	Humide
	1985	Année sèche (avec bonne confiance)	Normale

Tableau 39: rappel de la prévision du tercile des années sélectionnées et du tercile observé.

- Bilan sur la notation d'expert

Finalement, la notation d'expert donne globalement les mêmes tendances que celle des agriculteurs, même s'il faut garder en mémoire qu'elle utilise un panel d'exploitants plus réduit. Cette notation souligne que lorsqu'on considère les deux villages et toutes les années, la prévision n'a en majorité pas d'effet sur les rendements (62%). Malgré cela, il y a dans 31% des cas une amélioration

de ceux-ci, et une perte pour seulement 7%: cela souligne l'effet moyen plutôt positif de ces deux types de prévisions sur les rendements. Cependant, les résultats diffèrent entre les deux villages: les évolutions positives sont ainsi plus nombreuses à Paoskoto où la disponibilité de variétés d'arachide et un moins grand scepticisme à l'encontre de prévisions permet une réaction plus diversifiée aux prévisions, et donc plus efficace. Les années 1979 et 1992 qui donnent de bonnes prévisions montrent ainsi de nombreuses augmentations de rendement.

3.6 Discussion autour des prévisions scientifiques

3.6.1 Intérêt relatif pour les prévisions locales et scientifiques

On a donc vu que les agriculteurs utilisent leurs propres moyens de prévisions mais qu'ils sont également intéressés par ceux que nous présentons, puisqu'ils les utilisent dans les feuilles de jeu. Il semble donc pertinent de leur demander s'ils ont plus confiance dans les prévisions locales ou scientifiques, et comment ils voient leurs apports respectifs.

Les réponses à ces questions sont assez mitigées. Certains restent fidèles aux prévisions locales car "elles ont fait leurs preuves". Cette vision est partagée par la plupart des gens à Paoskoto alors qu'à Bacfassagal certains auraient plus confiance dans les prévisions scientifiques décennales car elles donnent des informations détaillées sur les dates et le volume d'eau. Beaucoup soulignent qu'ils font confiance aux deux types de prévisions conjointement et ne les opposent pas. Ils précisent que dans le cas où les deux moyens donnent la même indication, on est quasiment dans la certitude sur le comportement à adopter. De plus, ils comprennent parfaitement et acceptent que la prévision scientifique puisse se tromper car "seul Dieu ne se trompe pas".

3.6.2 Intérêt relatif pour les prévisions saisonnières et décennales

Il était également intéressant pour nous de savoir si une des deux informations présentées lors de ces ateliers était plus pertinente. Ainsi, la majorité des exploitants de Paoskoto trouve que la prévision décennale est plus intéressante pour eux car elle permet tout le long de la saison d'adapter le calendrier culturel. Certains cependant, notamment ceux qui ont adapté leurs variétés à chaque tour, portent leur préférence sur la prévision saisonnière. En revanche, les participants de Bacfassagal sont unanimes et préfèrent la prévision décennale qui est concrète, qui est "dans le chaud". Ils ont tous montré un vif intérêt pour cette information et pensent que la météo devrait systématiquement la diffuser. Comme on l'a vu à travers les fiches de jeu et les discussions, ils sont par contre beaucoup plus dubitatifs concernant la pertinence des prévisions saisonnières. On peut comprendre cela car les habitants de Bacfassagal ont moins de possibilités d'adaptation à ce genre de prévision qu'à Paoskoto, notamment à cause de la plus faible pluviométrie et de l'absence d'une coopérative semencière.

Cependant, on a vu que dans les deux villages les réactions étaient possibles dans l'état actuel des choses. Elles sont certes plus limitées à Bacfassagal mais existent avec le niébé et le mil sanio par exemple, ou l'ajout d'intrants. Il faut donc chercher précisément pourquoi la réaction à la prévision saisonnière est faible.

On peut penser que cette information trouve moins d'écho, non pas parce qu'elle est intrinsèquement inutile, mais parce qu'elle est beaucoup plus éloignée de ce que les agriculteurs utilisent le plus. Beaucoup d'entre eux nous ont en effet déclaré avoir déjà entendu parler des prévisions météorologiques journalières, qui sont finalement proches de la prévision décennale au niveau de l'horizon temporel, alors que l'information saisonnière est plus nouvelle. De plus, les moyens de prévisions locaux qu'ils nous ont décrits ont un horizon temporel proche de la décennale, ils savent donc déjà parfaitement comment réagir.

En résumé, il y a une moins bonne adhésion à la prévision saisonnière même si les réactions de certains exploitants nous montrent que cette information n'est pas inutile. Ce manque d'intérêt

pourrait venir de deux facteurs principaux: (i) Le peu d'options d'adaptation disponibles, surtout à Bacfassagal et (ii) la moindre habitude des participants à ce genre de prévision. Cette dernière interprétation est sujette à caution puisque, même si durant les ateliers nous n'avons pas noté de prévisions locales saisonnières, de nombreuses autres études en font mention (au Burkina Faso par exemple). Ce décalage peut venir par exemple d'une erreur de traduction mais peut également symboliser la prime importance du pas de temps décennal pour les agriculteurs.

3.6.3 Les paramètres caractéristiques de la saison importants pour les agriculteurs

Etant donné que la majorité des participants utilisait peu les prévisions saisonnières, nous leur avons demandé de quelles informations climatiques sur l'hivernage ils aimeraient idéalement disposer, quelques semaines avant la saison des pluies. Les réponses sont qualitativement les mêmes que celles trouvées dans la littérature avec: le début et la fin de la saison, le cumul global, la répartition. Si ces informations ont été citées sans ordre de préférence, plusieurs personnes pensent que le plus important reste la première pluie. Notons que certains participants de Paoskoto ont émis le souhait d'avoir des informations sur les températures ce qui semble être relié à la durée d'ensoleillement. Ils nous ont bien expliqué que s'il n'y avait pas assez de soleil, les rendements n'étaient pas bons.

4. Conclusion

4.1 Apports de ces ateliers

Ces ateliers participatifs dans le bassin arachidier du Sénégal avaient pour but d'analyser *in situ* la réaction potentielle d'agriculteurs à des prévisions pluviométriques décennales et saisonnières (tendance du cumul) ainsi que l'impact sur leur rendement. Pour cela, nous avons employé des données climatiques historiques réelles et des prévisions représentant l'incertitude de prévisions existantes, afin de refléter l'impact immédiat qu'auraient ces prévisions, avec les pratiques actuelles.

Si le programme prévu au départ a été modifié tout au long de ces ateliers, avec notamment moins d'années étudiées que prévues, nous avons néanmoins obtenu des informations fondamentales concernant l'utilisation des prévisions décennales et saisonnières dans les systèmes agricoles de Bacfassagal et Paoskoto.

En premier lieu, les discussions et l'analyse des fiches de jeu du tour n°1 (situation de contrôle) ont permis de comprendre en profondeur les pratiques culturelles des agriculteurs sénégalais. Si cela ne concerne pas directement la prévision, c'est un pré-requis indispensable pour analyser les réactions aux informations climatiques, notamment décennales. En effet, il ressort des ateliers que ces dernières ont clairement un impact sur le calendrier culturel: les agriculteurs attendent ainsi souvent la prévision pour savoir quoi faire. On relève notamment un impact majeur sur:

- le semis, dans trois cas: (i) une décennie sèche est annoncée à la suite d'une décennie pluvieuse ce qui entraîne un délai pour le semis de l'arachide ou du maïs; (ii) une pluie est prévue début juin ce qui pousse à semer le maïs plus tôt pour profiter de la pluie; (iii) une très grosse pluie est prévue après une décennie pluvieuse, ce qui permet de retarder le semis (maïs, arachide) pour éviter sa destruction.

- la récolte: dans certains cas, les prévisions permettent d'éviter les pluies lorsque les cultures sont à maturation et donc d'éviter les pertes dues aux ravageurs, moisissures et à la germination précoce des récoltes (arachide sans dormance)

- le sarclage: la prévision d'une décennie pluvieuse pousse les agriculteurs à anticiper le sarclage pour maximiser l'infiltration mais aussi lutter contre les adventices.

L'analyse des feuilles de jeu nous a également permis de lister les pratiques culturelles et les variétés présentes dans les deux villages, et ainsi de comprendre les réponses potentielles à la prévision saisonnière. A Paoskoto, qui dispose d'un plus large choix de cultivars d'arachide grâce à la

présence d'une coopérative agricole, la réaction à la prévision saisonnière est plus fréquente et concerne donc surtout un ajustement de la variété à la prévision. Cela se remarque particulièrement lorsque la prévision est tranchée (*i.e.* avec une probabilité dominante, notamment humide). Ce changement de variété d'arachide ne se retrouve pas à Bacfassagal où la réaction la plus marquée à la prévision saisonnière au niveau variétal est un taux de niébé plus élevé avec une prévision d'année sèche. La réaction à la prévision saisonnière semble aussi se traduire par une modification du taux d'épandage des engrais et des pesticides, surtout à Bacfassagal (on ne peut se prononcer sur Paoskoto où le code couleur sur ces actions n'était pas clair). Lorsqu'une année humide est prévue, il semble en effet que les exploitants utilisent de façon plus importante les intrants, ce qui recoupe les résultats de la modélisation du chapitre précédent. Cependant, cette modification des pratiques culturelles n'est pas ressortie lors des discussions.

L'impact des deux prévisions sur les rendements est plus difficile à établir et nous avons dû faire appel à un expert agronome pour compléter la notation par les participants. Si on considère les deux villages et toutes les années, la prévision n'a en majorité pas d'effet sur les rendements (62%). Malgré cela, il y a dans 31% des cas une amélioration de ceux-ci, et une perte pour seulement 7%: cela souligne l'effet moyen plutôt positif de ces deux types de prévisions sur les rendements. Cependant, les résultats diffèrent entre les deux villages: les évolutions positives sont ainsi plus nombreuses à Paoskoto où, comme on l'a vu, la disponibilité de variétés d'arachide et un moins grand scepticisme à l'encontre de prévisions permettent une réaction plus diversifiée aux prévisions, et donc plus efficace.

Bien que les prévisions saisonnières soient appréciées à Paoskoto, c'est la prévision décadaire qui est utilisée majoritairement dans les deux villages: les participants la jugent plus concrète pour leurs actions culturelles. Cependant, nous émettons l'hypothèse que cela ne signifie pas que la prévision saisonnière est inutile (on l'a vu surtout à Paoskoto) mais que (i) les possibilités de réactions sont dans l'état actuel des choses plus limitées (surtout à Bacfassagal) et (ii) les agriculteurs sont moins habitués à utiliser des informations climatiques avec un horizon temporel assez lointain. Il apparaît donc possible dans le futur de jouer sur ces deux points notamment par des activités de formation et par une diversification des stratégies culturelles pour augmenter l'utilisation de la prévision.

En effet, comme le montrent les discussions, les participants sont très ouverts et favorables aux informations proposées. S'ils continuent à accorder une grande confiance à leurs propres moyens de prévisions, ils ne créent pas d'opposition et pensent plutôt à un enrichissement. De plus, le caractère imprécis des informations n'est nullement une barrière car "seul Dieu ne se trompe jamais". La prévision scientifique peut ainsi entraîner une augmentation du rendement moyen lorsque la prévision est juste mais aussi une baisse en cas d'erreur.

Finalement, les ateliers présentent un outil intéressant qui nous permet tout d'abord de collecter des informations sur l'utilisation des prévisions mais qui familiarise aussi, sur des cas réels, les participants avec l'utilisation de ces informations. Ainsi, comme ils nous l'ont souligné, "cette formation est bien car elle nous a permis de connaître l'existence de ces prévisions et de savoir comment les utiliser". Cela nous pousse donc à penser aux améliorations potentielles qu'on pourrait réaliser afin de rendre ces ateliers plus intéressants pour les agriculteurs, avec des résultats plus facilement exploitables.

4.2 Améliorations futures

4.2.1 Panel

Nous voulions initialement avoir un nombre assez important de participants afin d'avoir des catégories d'âge, sexe, niveau d'étude assez variées et ainsi voir si les exploitants répondaient de façon différente aux prévisions. Cependant, les panels des deux villages ne sont pas vraiment représentatifs comme le montre par exemple l'absence de femmes. De plus, le nombre élevé de participants ne nous a pas permis d'aider chacun d'eux au maximum ni de discuter de façon très

approfondie sur le pourquoi de leurs choix cultureux en réaction à la prévision. Pour ces raisons, il semble donc pertinent pour de futurs ateliers de limiter le nombre de participants à cinq afin notamment d'approfondir le dialogue avec chacun d'eux. De plus, cet exercice étant relativement scolaire, des exploitants ayant été à l'école pourraient faciliter le déroulement de l'atelier, même si cela peut biaiser les résultats.

4.2.2 Déroulement et supports

Si on se place dans une situation sans contrainte temporelle ni financière, il semble de plus nécessaire d'étendre la durée de ces ateliers à trois jours. La première journée serait réservée uniquement au début des questionnaires et à l'apprentissage du jeu, la journée et demie suivante au jeu à proprement parler et la dernière demi-journée à la discussion. En effet, les participants ont rempli les grilles bien plus aisément le deuxième jour, car ils ont pu y réfléchir et en discuter ensemble le soir: ainsi, la première journée doit être dédiée à des années factices. Il ne faut de plus pas traiter plus de quatre années à la suite car un phénomène de lassitude et de fatigue s'installe si on n'introduit pas de nouvelles règles. Il pourrait également être intéressant de rendre les participants plus actifs durant la phase avec prévision en leur demandant par exemple d'aller chercher par eux-mêmes l'information souhaitée à un "guichet climatique", ce qui pourrait être possible avec cinq ou six agriculteurs.

Quant au support de jeu, le code couleur a posé des problèmes de façon évidente. Il faut limiter au strict minimum le nombre de couleurs et que celles-ci soient très contrastées. Il est également fondamental de prévoir à l'avance un panneau indiquant la correspondance entre la couleur et l'action culturelle et de ne pas se contenter simplement de le répéter à l'oral. Cela peut-être fait en utilisant des dessins (par exemple un sac d'engrais pour engrais chimiques) et en ajoutant la traduction en wolof (ou sérère) pour ceux qui savent lire, ce qui a été fait à Bacfassagal. Il faut d'autre part prêter une attention toute particulière à la carte d'identité de chaque champ en indiquant précisément les trois informations demandées. On peut rajouter aussi la superficie associée à chaque ligne afin d'avoir une idée de la production et pas seulement du rendement. La notation du rendement doit également recevoir plus d'attention et être réalisée non pas après chaque année mais à la fin, en comparant les années avec et sans prévision deux à deux. Cela permettrait de mieux faire ressortir les gains/pertes engendrés par les prévisions.

Pour les questionnaires individuels, certains changements sont nécessaires, de manière à plus se focaliser sur les prévisions avec des questions précises et moins sur les pratiques culturelles (voir le nouveau questionnaire-type en annexe, page 187). Ainsi, on a créé une partie détaillant les prévisions locales et une autre sur les informations souhaitées par les agriculteurs. De plus, on a ajouté un tableau "description de l'exploitation" plus facile à remplir et qui permet de vérifier notamment les cartes d'identité des parcelles utilisées sur les fiches de jeu. Il est enfin impératif de présenter un minimum le questionnaire aux enquêteurs avant les ateliers afin de bien préciser ce qu'on attend dans chaque question.

Synthèse générale et perspectives

1. Synthèse des principaux résultats

Tout au long de cette thèse, nous nous sommes intéressés aux systèmes de cultures d'Afrique de l'Ouest et plus particulièrement aux exploitations agricoles familiales de la bande sahélienne et soudano-sahélienne, caractérisées par une agriculture pluviale peu mécanisée et utilisant peu d'intrants. Si ces exploitations peuvent être étudiées sous de multiples facettes, et sont soumises à de nombreux facteurs de vulnérabilité extérieurs (e.g. fertilité des sols, volatilité des prix), nous avons choisi ici d'étudier le rôle des variations climatiques sur la production agricole. Cela paraît particulièrement pertinent quand on s'intéresse aux variations passées du climat et leurs liens avec l'agriculture.

1.1 Des variations climatiques passées liées à la production agricole

Au cours du siècle dernier et spécialement dans les cinquante dernières années, l'Afrique de l'Ouest a connu des modifications de son climat sans équivalent ailleurs dans le monde, avec notamment une baisse très importante de la pluviométrie dans les années 70/80/90. Cette baisse de la pluviométrie qui se traduit pratiquement par une diminution du nombre d'épisodes pluvieux a entraîné des crises alimentaires importantes comme en 73/74 et 83/84. Les cultures étant essentiellement pluviales, la variation interannuelle de leurs rendements est fortement liée à celle de la pluie, surtout en cas de déficit important. L'élévation de température (+1°C sur l'Afrique au XXIe siècle) joue quant à elle également sur la moyenne interannuelle des rendements. Ces constatations issues de la recherche scientifique ont été confirmées par les perceptions des agriculteurs qui notent dans quasiment tous les pays une diminution des pluies et une augmentation des températures. L'évolution du vent est quant à elle plus incertaine. De plus, les agriculteurs interrogés estiment que la baisse des rendements des céréales pluviales est due, selon les régions, entre 30 et 50% à ces facteurs climatiques, et plus précisément aux pluies insuffisantes. On voit ainsi, par plusieurs sources différentes, que la pluie et plus généralement le climat, sont fortement liés aux rendements des cultures pluviales en Afrique de l'Ouest. Si certains pays ont tout de même connu une augmentation de leurs rendements grâce à une modernisation de leurs pratiques agricoles, d'autres - comme le Niger - ont vu les rendements de leur principale culture vivrière (le mil) diminuer. La production agricole totale a cependant pu suivre la demande accrue, causée par l'augmentation de la population, grâce à l'augmentation des surfaces cultivées (arrêt de la jachère et colonisation de nouvelles zones). Ces pratiques n'étant pas reproductibles indéfiniment et entraînant également une baisse de fertilité des sols et une pression sur l'environnement, la production future ne pourra pas toujours croître via ce procédé, ce qui renforcera dans le siècle prochain l'influence du climat sur la production agricole. Etudier le climat futur de la sous région et l'impact potentiel sur la production agricole peut ainsi être une première étape pour se prémunir des effets du changement climatique.

1.2 Un futur incertain mais chaud qui entraîne une baisse des rendements

Les scénarii climatiques futurs calculés par les modèles prévoient pour le XXIe siècle des variations importantes de deux variables fondamentales, la pluie et la température. Tous les modèles projettent ainsi un réchauffement (de +2°C à +6°C en 2100) bien plus important qu'au XXe siècle. Pour la pluie, si les modèles ne s'accordent pas sur l'évolution du cumul annuel, des modifications dans les dates de démarrage et de fin de la saison sont possibles. De plus, certains modèles prévoient

des variations de pluviométrie importantes, en positif ou en négatif. Tout cela peut donc avoir un impact important sur les rendements agricoles.

Afin d'avoir une vue la plus globale possible et d'éviter de fonder nos conclusions sur une seule source, nous avons réalisé une revue de la littérature scientifique sur le sujet. Les évolutions des rendements futurs issues de ces seize études montrent ainsi une grande dispersion (de -50% à +90%, tous pays, cultures, modèles, et horizons de temps confondus) avec cependant un signal négatif marqué (médiane= -11%). Il faut malgré tout noter que la plupart des études ne tient pas compte d'une possible adaptation des pratiques culturales aux changements climatiques, ce qui pourrait tempérer cette tendance. Ce signal négatif est suggéré aussi bien par les modèles agronomiques empiriques que mécanistes, alors que l'approche ricardienne donne des résultats très contrastés, même au sein d'une même étude. L'impact prévu est plus important au Nord (-18% pour la médiane des pays soudano-sahéliens) qu'au Sud de la sous région (pays guinéens, -13%) ce qui est dû à des projections plus chaudes dans la partie nord de l'Afrique de l'Ouest. De plus, les impacts sur le rendement des cultures sont plus négatifs avec un forçage radiatif fort, ce qui souligne l'importance de l'atténuation du changement climatique.

La tendance négative des évolutions des rendements moyens futurs vient principalement de l'amplitude de l'augmentation de température prévue par les modèles, qui est bien plus importante que les changements de précipitation. Cependant, l'évolution du cumul pluviométrique, suivant qu'il est négatif ou pas, peut aggraver ou modérer le signal négatif induit par l'augmentation des températures. Enfin, les résultats soulignent le rôle central de l'effet fertilisant du carbone sur le signe et l'amplitude des évolutions de rendement. Cet effet est particulièrement important pour les scénarii avec de fortes concentrations en carbone et pour les plantes ayant une photosynthèse dite en C3 (e.g. le soja et le manioc). Comme les cultures vivrières sont en Afrique de l'Ouest principalement C4 (mil, maïs, sorgho), cet effet positif est plus limité pour la sous-région.

Ces constatations confirment en premier lieu l'intérêt d'étudier le lien entre les rendements et les variables climatiques, puisqu'on voit qu'un signal négatif se dégage. Cependant, cette valeur médiane de -11% est à relativiser au regard des autres évolutions possibles (évolution de la technique, de la démographie). Il faut ainsi être conscient que le climat aura bien un rôle important pour la sécurité alimentaire future, mais ce ne sera pas le seul, ni forcément le plus important (voir par exemple Müller *et al.* (2010)). En deuxième lieu, cette revue a permis de soulever un certains nombres de points à approfondir pour de futures études de ce type. Nous en avons sélectionné quatre sur lesquelles nous avons mis l'accent par la suite: (i) la diversité des scénarii climatiques utilisés, (ii) la précision et la diversité des variétés des cultures employées, (iii) l'hétérogénéité des résultats au sein de la sous-région et (iv) les rôles respectifs de la pluie et de la température sur l'évolution des rendements moyens et leur variation interannuelle.

1.3 Des baisses de rendement moyen du mil et du sorgho dues à la hausse de température

Ainsi, nous avons étudié les rendements futurs de deux céréales en Afrique de l'Ouest en créant un jeu de 35 scénarii climatiques, fondés sur sept anomalies de température (+0°C à +6°C) et cinq de pluie (-20% à +20%). Pour chacun de ces scénarii, nous avons simulé avec le modèle SARRA-H les rendements de six variétés contrastées de mil et de sorgho, sur 35 stations réparties en Afrique de l'Ouest. Les résultats montrent que le rendement moyen des céréales décroît avec l'augmentation de la température et la diminution des pluies. La plupart des scénarii (31/34) prévoit donc une décroissance du rendement moyen pouvant aller jusqu'à -41% (scénario +6°C/-20%). Cette évolution négative des rendements moyens est due principalement à l'augmentation de température. L'évolution positive (négative) du cumul pluviométrique peut toutefois atténuer (aggraver) cette décroissance des rendements moyens. Celle-ci est due principalement à une augmentation de la demande climatique (ETO: +8% en moyenne pour le scénario +4°C), à une augmentation de la respiration de maintenance par unité de biomasse (+30%) et à un raccourcissement du cycle des

cultures (-10 jours). Si on s'intéresse aux climats futurs prévus par 22 GCMs pour les horizons 2040 et 2080, on voit qu'aucune évolution positive du rendement moyen n'est prévue, alors qu'une baisse de la variabilité interannuelle est possible et que des évolutions fortement négatives ([-41%:-30%]) sont possibles à l'horizon 2080, alors qu'elles ne sont pas prévues pour l'horizon 2040.

On s'intéresse par la suite à la variabilité interannuelle des rendements, via l'étude du Coefficient de Variation (CV). Si les variations du CV semblent en premier lieu décrire dans un bon nombre de cas une évolution positive (*i.e.* baisse de variabilité interannuelle), 17 scénarii sur 34 donnent des valeurs de CV qui ne sont pas statistiquement différentes à 5% du scénario de référence. Les valeurs significativement différentes décrivent quant à elles quasiment toutes (15/17) une augmentation du CV. Le futur hypothétique prévu par les GCMs est donc caractérisé par peu d'évolution du CV, ou dans une moindre mesure une augmentation de celui-ci, spécialement pour l'horizon 2080. Cette faible évolution de la variabilité interannuelle des rendements est due à la méthode employée pour créer les scénarii climatiques, qui conserve la variabilité interannuelle. Les différences significatives proviennent quant à elle des scénarii avec une baisse de la pluie qui provoquent un effet de seuil. En effet, toutes les cultures qui étaient, avec le scénario de référence, dans une situation limite vont avoir avec -10% ou -20% de pluie un rendement proche de zéro (semis raté, stress hydrique...)

1.4 Un impact différent selon la zone et les variétés considérées

D'autre part, ces impacts ne sont pas répartis de façon homogène dans toute la sous-région. Si on considère que les cinq scénarii de pluie sont équiprobables, la probabilité (par exemple pour +4°C) d'avoir des baisses de rendement inférieures à -10% est beaucoup plus forte dans le Sud de la zone. Enfin, les variétés ont des réactions différentes aux scénarii climatiques. L'impact est en effet plus négatif pour les sorghos et mils à cycle court et constant que pour les variétés photopériodiques (-28% vs -40% pour le scénario +4°C/-20%). Ces dernières ont en effet une partie de leur cycle qui n'est pas influencée par la température mais par la photopériode. La diminution de la longueur du cycle des variétés photopériodiques est donc plus faible et la baisse de rendement également. Cela confirme donc les résultats de la revue qui soulignent la nécessité de caractériser précisément les variétés étudiées. De plus, cela souligne encore une fois l'intérêt de la prise en compte du photopériodisme pour l'élaboration de variétés futures (Soumaré *et al.* (2008)).

Finalement, nous avons vu que (i) les rendements étaient liés aux variations climatiques et que ces variations pouvaient entraîner des crises alimentaires importantes, que (ii) le poids du climat dans la production agricole future allait se renforcer et que (iii) le climat futur risquait plutôt d'engendrer des pertes de rendements pour les cultures vivrières en Afrique de l'Ouest. Nous avons donc étudié par la suite un système qui permettrait d'augmenter les rendements moyens et de diminuer leur variabilité interannuelle (*i.e.* le risque de très mauvaises années) sous le climat actuel mais également sous un climat évoluant de manière incertaine. Ainsi nous nous sommes intéressés aux prévisions saisonnières, qui donnent aux agriculteurs, avant la saison des pluies, la tendance du cumul pluviométrique de celle-ci selon trois catégories (plutôt sec, normal ou humide). Que ce soit avec des températures actuelles ou dans un monde à +4°C, cette information peut toujours se révéler intéressante pour les exploitants qui peuvent ainsi potentiellement modifier leurs pratiques culturales pour augmenter leur revenu moyen mais surtout pour diminuer le risque de mauvaises années.

1.5 Les prévisions saisonnières permettent d'augmenter le revenu des agriculteurs nigériens

Pour pouvoir quantifier la valeur de prévisions de ce type, qui existent depuis plusieurs années en Afrique, mais aussi pour tester de nouveaux indices climatiques qui pourraient être bénéfiques pour les agriculteurs sahéliens, nous avons donc réalisé une quantification *ex ante* de la

valeur de plusieurs types de prévisions saisonnières en nous focalisant sur des cultivateurs de mil au Niger. Nous avons ainsi évalué la valeur potentielle de trois types de prévisions concernant la catégorie du cumul pluviométrique de la saison à venir: (i) une prévision imparfaite (avec une précision proche de la réalité) du tercile du cumul pluviométrique (plutôt sec, normal ou humide), (ii) une prévision parfaite de ce tercile, et (iii) une prévision parfaite de ce même tercile à laquelle on a ajouté une prévision de la date de début et de fin de la saison pluvieuse. Les simulations sur une période de 18 ans (1990/2007) montrent qu'il est possible pour les agriculteurs de modifier leurs pratiques culturales afin d'augmenter leurs revenus, notamment en jouant sur les dates de semis, les variétés semées et l'utilisation d'intrants chimiques. Le bénéfice est le plus modeste avec la prévision imparfaite (+6.9%, sur les 18 ans), légèrement supérieur avec une prévision parfaite (+11%) et atteint +34% avec des informations supplémentaires sur le début et la fin de la saison: ces informations permettent en effet d'utiliser de nouvelles stratégies culturales. D'autre part, la prévision imparfaite, dont la précision est proche de la réalité, ne se contente pas de faire augmenter le revenu moyen. Elle permet également d'augmenter les revenus des années sèches (+7.1%) et donc de réduire le risque de mauvaises récoltes. Le bénéfice de cette prévision est enfin maximum en année humide (+12.1 %) car les variétés à cycle long choisies et l'apport de fertilisant donnent des résultats spécialement positifs.

Nous avons donc montré que les prévisions saisonnières peuvent augmenter le revenu moyen des agriculteurs tout en diminuant leur risque d'avoir des mauvaises années et cela même pour une prévision imparfaite et fondée sur un indice climatique simple. Cependant, nous avons fait dans cette étude plusieurs hypothèses qui confèrent aux résultats un côté quelque peu théorique.

De ce fait, nous avons voulu voir, en considérant les réactions réelles des agriculteurs et des prévisions avec une précision proche de la réalité, si l'intérêt des informations saisonnières étaient toujours aussi important. Nous nous sommes également intéressés aux prévisions décennales, qui sont générées par les agences météorologiques nationales (*e.g.* au Sénégal) et qui sont de plus proposées aux paysans en complément des prévisions saisonnières dans certaines études *ex post* visant à évaluer le potentiel de l'information climatique. Pour cela, nous avons élaboré des ateliers participatifs dans deux villages sénégalais pour étudier les changements culturels induits par l'utilisation des prévisions saisonnières et décennales, et l'impact sur les rendements.

1.6 Les prévisions saisonnières et surtout décennales entraînent des changements de pratiques culturales

Grâce à un support de restitution papier, les participants aux ateliers ont pu retranscrire leurs choix culturels à l'échelle décennale pour plusieurs années sélectionnées auparavant. Ils ont fait tout d'abord cela sans recevoir de prévision, afin de symboliser la situation de contrôle (situation actuelle). Ils ont par la suite rejoué ces mêmes années avec une information sur le cumul pluviométrique saisonnier et une information - tous les dix jours - sur le type de pluie à venir. En comparant leurs pratiques culturales avec et sans prévision, on a pu en déduire l'impact des prévisions. Les résultats et les discussions montrent que les participants, mêmes s'ils ont déjà des moyens locaux de prévisions font un bon accueil à ces nouvelles informations, surtout les prévisions décennales. Celles-ci permettent en effet d'optimiser les pratiques culturales comme le semis, la récolte et le sarclage, dans différentes situations: par exemple, pour le maïs et l'arachide, éviter une sécheresse juste après le semis. Les prévisions saisonnières sont quant à elles utilisées plus marginalement, et surtout dans le village ayant accès à plus de cultures/variétés grâce à une plus forte pluviométrie et à la présence d'une coopérative semencière. Certains agriculteurs utilisent ces prévisions saisonnières pour choisir leur variété d'arachide et aussi les types de cultures (niébé si l'année est prévue sèche). On note également un plus fort taux d'utilisation des intrants (engrais et produits phytosanitaires) lorsque la prévision prévoit une année humide. L'impact de ces changements culturels sur les rendements est par contre plus complexe à évaluer, et on a dû faire appel à un expert agronome. Si on considère les deux villages et toutes les années, la prévision n'a en

majorité pas d'effet sur les rendements (62%). Malgré cela, il y a dans 31% des cas une amélioration de ceux-ci, et une perte pour seulement 7%: cela souligne l'effet moyen plutôt positif de ces deux types de prévisions sur les rendements. Les résultats sont cependant contrastés entre les villages: le village disposant de plus de variétés d'arachide présente ainsi plus d'évolution positive des revenus.

Ces résultats tempèrent donc quelque peu ceux de l'étude théorique. L'utilité intrinsèque des prévisions saisonnières n'est pas remise en question puisque les agriculteurs la trouvent globalement intéressante, mais sa valeur dépend clairement des possibilités de réaction à la disposition des exploitants. La disponibilité de différentes cultures et de variétés contrastées est ainsi un pré-requis fondamental pour obtenir une utilisation optimale des prévisions saisonnières. Cependant, on retrouve bien (pour l'un des villages au moins) le comportement simulé par notre modèle économique précédent qui vise à utiliser plus d'intrants si l'année est prévue humide. Les prévisions décennales paraissent quant à elles utiles, même dans la situation actuelle, et les agriculteurs ont émis le souhait que les services de la météorologie nationale la diffusent systématiquement. Elles donnent des informations notamment pour la date optimale de semis et de récolte, ce qui recoupe finalement la prévision saisonnière du début et de la fin de la saison (onset et offset) qu'on a étudiée auparavant et qui donnait en effet de bons résultats.

2. Perspectives

Les prolongements et approfondissements partant de ce travail sont présentés par la suite par thématique. De manière générale, on ne peut que plaider encore une fois pour une collecte des données (*e.g* pluie, rendements, températures, données socio-économiques) encore plus généralisée en Afrique de l'Ouest. Si un réel effort a été fait récemment pour développer des sites avec une haute densité de données, comme le degré carré de Niamey, de nombreuses stations de mesure ailleurs dans la sous-région ont cessé de fonctionner dans les années 80, ce qui crée désormais des zones où les informations manquent clairement. La quantité de données disponibles et leur qualité sont deux pré-requis fondamentaux pour calibrer correctement n'importe quel type de modèle et ainsi avoir des résultats robustes. Lobell et Burke (2010) montrent ainsi que la précision de leur modèle agronomique empirique augmente de façon croissante avec le nombre d'années de données climatiques et de rendement disponibles. De plus, la qualité de ces données et les méthodes de comblement employées devraient également être décrites plus en détail de manière à ce qu'on puisse avoir au moins une idée de la validité des résultats. Pour les données de pluie, Teegavarapu et Chandramouli (2005) soulignent ainsi que les différentes méthodes de comblement peuvent donner des résultats différents. Il serait d'ailleurs intéressant de voir l'impact que peuvent avoir les différentes modifications apportées aux données (*e.g.* pluies, températures) sur les résultats finaux. L'incertitude associée aux résultats est désormais un point fondamental pour les études d'impact, afin d'éviter les controverses sur une valeur unique.

2.1 Sur les projections de rendement futur

Nous avons défini dans la revue un certain nombre de points qu'il convenait d'approfondir. Si nous en avons traité certains dans le chapitre 3, il reste cependant plusieurs axes à explorer. Nous nous sommes ainsi particulièrement intéressés au rôle de la température et de la pluie, mais d'autres variables climatiques ayant un rôle dans la photosynthèse, comme le rayonnement (Oettli *et al.* (2011), paraissent entraîner une grande dispersion des projections de rendement. Pour avoir une gamme de scénarii plus large, il faudrait ainsi prendre cette variable en compte. Cela peut-être fait en utilisant les sorties des GCMs, notamment les futures projections de l'AR5, dont les biais doivent alors être corrigés, ou alors en élaborant des scénarii uniformes comme nous l'avons fait pour étudier l'impact spécifique de cette variable.

Il est également nécessaire d'étudier la sensibilité des résultats à trois paramètres: l'effet fertilisant du CO₂, les techniques de descente d'échelle et les modèles agronomiques employés. En

effet, des études sur d'autres domaines ou d'autres régions du monde ont montré que les résultats pouvaient varier de façon importante selon les méthodes employées. Si choisir plusieurs méthodes de descente d'échelle et plusieurs modèles agronomiques ne permet pas de quantifier exactement l'incertitude inhérente à ces procédés, cela peut en donner tout de même une première approximation. Dans cette optique, le projet AGMIP (Agriculture Model Intercomparison and Improvement Project), débuté récemment, propose une tentative sans précédent de comparaison de modèles agronomiques et de leurs projections, sur le monde entier, à laquelle il paraît fondamental de s'associer.

2.2 Sur les évaluations *ex ante* des prévisions saisonnières

La comparaison de notre étude théorique sur le Niger et de la réalité du terrain a permis de souligner certaines pistes qu'il serait bon d'améliorer pour de futures études *ex ante*.

- Le type de prévision

On a vu durant les ateliers que les prévisions décadaires donnaient une approximation intéressante de la prévision saisonnière de la date de début et de fin de saison. Il faudrait les intégrer au modèle économique et voir ainsi le gain qu'elle génèrent comparé à une hypothétique prévision saisonnière du début des pluies. Il serait de plus nécessaire d'utiliser pour une évaluation future une prévision probabiliste (et non déterministe) du cumul saisonnier comme celle employée dans le chapitre 5, afin de se situer dans une situation plus proche de la réalité.

- Les stratégies d'adaptation

Comme on l'a vu, l'intérêt de la prévision saisonnière dépend étroitement des possibilités de réaction des agriculteurs. Une modélisation d'une exploitation plus diversifiée que celle considérée sur le Niger (chapitre 4) passe donc par l'évaluation des rendements de cultures comme l'arachide, le maïs, voire le riz. Il est donc nécessaire de pouvoir simuler ces rendements de façon fiable, via le modèle SARRA-H, ou un autre. De plus, nous n'avons pas considéré au sein d'un même village de type de sols différents. Il pourrait être intéressant de définir une nouvelle stratégie en laissant la possibilité aux agriculteurs simulés entre deux grands types de sols. Enfin, nous avons vu qu'il y avait en Afrique de l'Ouest une interdépendance croissante entre l'agriculture et l'élevage dont il faudrait également tenir compte dans une étude à venir.

- Intérêt des prévisions saisonnières dans le futur

En considérant des projections de pluies futures au pas de temps journalier, on peut réaliser le même travail que sur le temps passé pour voir dans quelle mesure l'intérêt des prévisions saisonnières peut augmenter. Par exemple, dans le cas de notre étude au Niger, puisqu'on a vu que le réchauffement induisait un raccourcissement des cycles, la variété somno pourrait devenir nettement plus bénéfique que sur la période actuelle où son cycle est fréquemment trop long. Une telle étude impliquerait néanmoins de faire des hypothèses sur les variations futures des prix.

- Couplage des prévisions saisonnières avec un système assurantiel

Les résultats de l'étude *ex ante* du chapitre 4 sont valables pour des agents ayant une forte aversion au risque et cherchant à éviter les stratégies avec une forte variabilité interannuelle, même si le revenu moyen associé est élevé. Afin de donner un effet plus important aux prévisions et d'augmenter leur valeur, on pourrait essayer, au moins de manière théorique tout d'abord, de coupler les prévisions saisonnières avec un filet de sécurité qui permettrait aux agriculteurs de diminuer leur aversion au risque. Comme souligné par Meza *et al.* (2008), cela serait possible notamment avec les assurances agricoles. De telles assurances ont déjà donné des résultats

prometteurs dans des régions variées du globe, par exemple en Inde (Giné *et al.* (2007)), au Malawi (Hellmuth *et al.* (2007)) ou en Afrique de l'Ouest pour le maïs et l'arachide (Berg *et al.* (2009)). Coupler les assurances agricoles et les prévisions saisonnières pourrait donc être un axe de recherche futur prometteur.

2.3 Sur les ateliers participatifs et l'utilisation des prévisions saisonnières

Même si nous n'avons pas pu, pendant les ateliers organisés au Sénégal, accomplir tous les buts que nous nous étions fixés, ce concept paraît tout de même intéressant et mériterait d'être approfondi et amélioré. Il permet en effet une compréhension en détail des changements effectués par les agriculteurs et pourrait donner une quantification moins théorique de l'utilisation des prévisions qu'un simple modèle économique. Nous avons listé dans le chapitre 5 les évolutions futures qu'il faudrait apporter à ce type d'atelier pour atteindre de façon plus précise le but fixé: notamment, simplifier la structure du jeu, travailler avec un nombre d'exploitants plus réduit, sur trois jours et axer le questionnaire plus fortement sur les connaissances des prévisions. Ces ateliers pourraient de plus être utilisés dans le futur pour tester la pertinence de certaines informations que la littérature souligne comme fondamentales, comme la date de début de la saison. Il pourrait notamment être pertinent de comparer l'efficacité relative d'une prévision saisonnière du démarrage de pluies avec une simple prévision décadaire.

De plus, si ces ateliers n'avaient pas pour but de modifier les pratiques des participants, certains d'entre eux nous ont précisé qu'ils étaient satisfaits car cela leur avait montré l'existence de telles prévisions et la manière dont ils pouvaient réagir en tenant compte notamment de leur imprécision. Si cela semble plutôt positif, ce commentaire montre aussi la nécessité d'intégrer les services météorologiques nationaux à ce type d'atelier. En effet, ceux-ci mènent déjà dans certains villages des ateliers explicatifs sur les prévisions saisonnières et leur utilisation. Intégrer les deux approches permettrait donc d'avoir d'une part un discours parfaitement cohérent sur le format de la prévision saisonnière mais également de montrer - à un niveau plus académique - l'intérêt des formations de l'ANAMS, en comparant par exemple un panel ayant bénéficié de la formation, et un autre pas. D'autre part, cela permettrait de garder un meilleur contact avec les gens ayant participé à nos ateliers pour qu'ils continuent à recevoir les prévisions, afin que ce ne soit pas seulement pour eux un atelier parmi d'autres, sans suite pratique.

Références

Abdoulaye, T. et Sanders, J. H., 2005: Stages and determinants of fertilizer use in semiarid African agriculture: the Niger experience. *Agricultural Economics*, **32**, 167-179.

Adejuwon, J., 2006a: Food Security, Climate Variability and Climate Change in Sub Saharan West Africa, 156 pp.

Adejuwon, J. O., 2006b: Food crop production in Nigeria. II. Potential effects of climate change. *Climate Research*, **32**, 229-245.

Affholder, F., 1995: Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dryland condition. *Field Crops Research*, **41**, 109-121.

Ainsworth, E. A., Leakey, A. D. B., Ort, D. R., et Long, S. P., 2008: FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply. *New Phytologist*, **179**, 5-9.

Ajetomobi, J., Abiodun, A., et Hassan, R., 2010: Economic impact of climate change on irrigated rice agriculture in Nigeria. *Joint 3rd African Association of Agricultural Economists (AAAE) and 48th Agricultural Economists Association of South Africa (AEASA) Conference*, Cape Town, South Africa.

Alhassane, A., 2009: Effet du climat et des pratiques culturelles sur la croissance et le développement du mil (*Pennisetum Glaucum* [L.] R.BR.) au Sahel : Contribution à l'amélioration du modèle SARRA-H de prévision des rendements., University of Cocody, 223 pp.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., et Smith, M., 1998: *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*, FAO.

Amadou, M., Gandah, M., Biolders, C. L., et Vanduivenbooden, N., 1999: Efficient soil water use: the key to sustainable crop production in the dry areas of West Asia, and North and Sub Saharan Africa *Proceedings of the workshops organized by the Optimizing Soil Water Use Consortium*, Niamey, Niger et Amman, Jordanie, 143-164.

Apata, T. G., Samuel, K. D., et Adeola, A. O., 2009: Analysis of Climate Change Perception and Adaptation among Arable Food Crop Farmers in South Western Nigeria. *Contributed Paper prepared for presentation at the International Association of Agricultural Economists' 2009 Conference*, Beijing, China.

Aquadev Sénégal, sans date: Fiche technique concernant la culture du niébé, de l'arachide et du mil dans les pays Sahéliens, 5 pp.

Aune, J. B. et Bationo, A., 2008: Agricultural intensification in the Sahel - The ladder approach. *Agricultural Systems*, **98**, 119-125.

Balme, M., Galle, S., et Lebel, T., 2005: Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse*, **16**, 15-22.

Barnabas, B. A. T., Jager, K., et Feher, A., 2008: The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environ*, **31**, 11-38.

Baron, C., Sultan, B., Balme, M., Sarr, B., Traore, S., Lebel, T., Janicot, S., et Dingkuhn, M., 2005: From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **360**, 2095–2108.

Barrios, S., Ouattara, B., et Strobl, E., 2008: The impact of climatic change on agricultural production: Is it different for Africa? *Food Policy*, **33**, 287-298.

Bationo, A., Koala, S., et Ayuk, E., 1998: Fertilité des sols pour la production céréalière en zone sahélo-soudanienne et valorisation des phosphates naturels *Cahiers Agricultures*, **7**, 365-371.

Batté, L. et 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**, 283-299.

Battisti, D. S. et Naylor, R. L., 2009: Historical Warnings of Future Food Insecurity with Unprecedented Seasonal Heat. *Science*, **323**, 240-244.

Beintema, N. M. et Stads, G.-J., 2004: Sub-Saharan African agricultural research. Recent investment trends. *Outlook on AGRICULTURE* **33**, 239–246.

Ben Mohamed, A., Vanduivenbooden, N., et Abdousallam, S., 2002: Impact of climate change on agricultural production in the Sahel - Part1. methodological approach and case study for millet in Niger. *Climatic Change*, **54**, 327-348.

Berg, A., 2011: Représentation des cultures tropicales dans le modèle de surface continentale ORCHIDEE : apport à l'étude des interactions climat/agriculture, Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques, Université Pierre et Marie Curie, 237 pp.

Berg, A., Quirion, P., et Sultan, B., 2009: Weather-index drought insurance in Burkina-Faso: assessment of its potential interest to farmers. *Weather, Climate and Society*, **1**, 71-84.

Bezançon, G., Pham, J.-L., Deu, M., Vigouroux, Y., Sagnard, F., Mariac, C., Kapran, I., Mamadou, A., Gérard, B., Ndjeunga, J., et Chantereau, J., 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**, 223-236.

Biasutti, M. et Sobel, A. H., 2009: Delayed Sahel rainfall and global seasonal cycle in a warmer climate. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L23707.

Blein, R., Soulé, B. G., Dupaigne, B. F., et Yérima, B., 2008: Les potentialités agricoles de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO), 116 pp.

Bondeau, A., Smith, P. C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., MÜLLer, C., Reichstein, M., et Smith, B., 2007: Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology*, **13**, 679-706.

Breisinger, C., Diao, X., Thurlow, J., et Al Hassan, R., 2011: Potential impacts of a green revolution in Africa - The case of Ghana. *Journal of International Development*, **23**, 82–102.

Brondeau, F., 2011: L'agrobusiness à l'assaut des terres irriguées de l'Office du Niger (Mali). *Cahiers Agricultures*, **20**, 136-143.

Brunel, S., 2003: *L'Afrique: un continent en réserve de développement*. Bréal, 235 pp.

- Brüntrup, M., 2000: The level of risk aversion among African farmers – results of a gambling approach. *Deutscher Tropentag 2000 in Hohenheim*, Hohenheim.
- Butt, T., McCarl, B., Angerer, J., Dyke, P., et Stuth, J., 2005: The economic and food security implications of climate change in mali. *Climatic Change*, **68**, 355-378.
- Cappelaere, B., Descroix, L., Lebel, T., Boulain, N., Ramier, D., Laurent, J. P., Le Breton, E., Mamadou, I., Boubkraoui, S., Bouzou Moussa, I., ., F. G., Issoufou, H. B. A., Nazoumou, Y., Quantin, G., Chaffard, V., et Ottlé, C., 2009: The AMMA-CATCH experiment in the cultivated Sahelian area of south-west Niger -- Investigating water cycle response to a fluctuating climate and changing environment. *J. Hydrol.*, **375**, 34-51.
- Challinor, A., Wheeler, T., Garforth, C., Craufurd, P., et Kassam, A., 2007: Assessing the vulnerability of food crop systems in Africa to climate change. *Climatic Change*, **83**, 381-399.
- Challinor, A. J., Ewert, F., Arnold, S., Simelton, E., et Fraser, E., 2009: Crops and climate change: progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation. *Journal of Experimental Botany*, 1-15.
- Chavas, J. et Holt, M., 1996: Economic behaviour under uncertainty: a joint analysis of risk preferences and technology. *Review of Economics and Statistics*, **78**, 329–335.
- Chiappori, P.-A. et Paiella, M., 2008: Relative Risk Aversion Is Constant: Evidence from Panel Data *Department of economic studies, Discussion paper 5*.
- Christiaensen, L., Demery, L., et Kuhl, J., 2011: The (evolving) role of agriculture in poverty reduction - An empirical perspective. *Journal of Development Economics* **96**, 239-254.
- Chuku, C. et Okoye, C., 2009: Increasing resilience and reducing vulnerability in sub-Saharan African agriculture: Strategies for risk coping and management. *African Journal of Agricultural Research*, **4**, 1524-1535.
- CIRAD, GRET, et Ministère des Affaires étrangères, 2004: *Mémento de l'agronome*. 1691 pp.
- Collins, J. M., 2011: Temperature Variability over Africa. *Journal of Climate*, **24**, 3649-3666.
- Collomb, P., 1999: *Une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici à 2050*. Economica-FAO.
- Cooper, P. J. M., Dimes, J., Rao, K. P. C., Shapiro, B., Shiferaw, B., et Twomlow, S., 2008: Coping better with current climatic variability in the rain-fed farming systems of sub-Saharan Africa: An essential first step in adapting to future climate change? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **126**, 24-35.
- Coulibaly, P. et Evora, N. D., 2007: Comparison of neural network methods for infilling missing daily weather records. *Journal of Hydrology* **341**, 27-41.
- Courade, G., 2003: L'avenir de l'Afrique sub-saharienne. *Cycle de conférences 2002-2003 - Perspectives - Quel avenir pour l'homme?*, Perpignan, France.
- D'Aquino, P., Le Page, C., Bousquet, F., et Bah, A., 2003: Using Self-Designed Role-Playing Games and a Multi-Agent System to Empower a Local Decision-Making Process for Land Use Management: The SelfCormas Experiment in Senegal. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, **6**.

Dai, A., 2006: Precipitation Characteristics in Eighteen Coupled Climate Models. *Journal of Climate*, **19**, 4605-4630.

de Noblet-Ducoudré, N., Gervois, S., Ciais, P., Viovy, N., Brisson, N., Seguin, B., et Perrier, A., 2004: Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie*, **24**, 397-407.

de Rouw, A., 2004: Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. *Agricultural Systems*, **81**, 73-93.

Dermody, O., O'Neill, B. F., Zangerl, A. R., Berenbaum, M. R., et DeLucia, E. H., 2008: Effects of elevated CO₂ and O₃ on leaf damage and insect abundance in a soybean agroecosystem. *Arthropod-Plant Interactions*, **2**, 125–135.

Dinar, A., Hassan, R., Mendelsohn, R., et Benhin, J., 2008: *Climate Change and Agriculture in Africa. Impact Assessment and Adaptation Strategies*. Earthscan.

Dingkuhn, M., Singh, B. B., Clerget, B., Chantereau, J., et Sultan, B., 2006: Past, present and future criteria to breed crops for water-limited environments in West Africa. *Agricultural Water Management*, **80**, 241-261.

Dingkuhn, M., Baron, C., Bonnal, V., Maraux, F., Sarr, B., Sultan, B., Clopes, A., et Forest, F., 2003: Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional. *Decision support tools for smallholder agriculture in sub-Saharan Africa: a practical guide*, T. E. Struif Bontkes and M. C. S. Wopereis, Eds., IFDC, 127-139.

Dione, M., Diop, O., Dièye, P., et Ndao, B., 2008: Caractérisation et typologie des exploitations agricoles familiales du Sénégal. Tome 3: bassin arachidier, 31 pp.

Diop, O., 2006: L'exploitation agricole face aux besoins de la famille paysanne dans la région de Kaolack au Sénégal, Département d'Economie et Sociologie Rurales, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Thiès, 81.

Douville, H., 2006: Detection-attribution of global warming at the regional scale: How to deal with precipitation variability? *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L02701.

Druyan, L. M., Feng, J., Cook, K. H., Xue, Y., Fulakeza, M., Hagos, S. M., Konare, A., Moufouma-Okia, W., Rowell, D. P., Vizi, E. K., et Ibrah, S. S., 2009: The WAMME regional model intercomparison study. *Climate Dynamics*.

Ducharne, A., Habets, F., Déqué, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., Pagé, C., Ribstein, P., Sauquet, E., Thiéry, D., Terray, L., Viennot, P., Boé, J., Bourqui, M., Crespi, O., Gascoin, S., et Rieu, J., 2009: *Projet REXHySS: Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme*. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer., 62 pp.

Dugué, P., Vall, E., Lecomte, P., Klein, H.-D., et Rollin, D., 2004: Evolution des relations entre l'agriculture et l'élevage dans les savanes d'Afrique de l'Ouest et du Centre. *OCL*, **11**, 268-276.

Fall, S., Barbier, B., Muller, B., et Thioune, M., 2009: Analyse de la vulnérabilité. *Tiempo Afrique*, **2**, 20-23.

FAO, 2002: Niger. Résultats des démonstrations d'engrais au poquet sur mil. Années 1999, 2000 et 2001., FAO.

Fischer, G., Frohberg, K., Parry, M. L., et Rosenzweig, C., 1996: The potential effects of climate change on world food production and security. *Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes*, F. Bazzaz and W. Sombroek, Eds., FAO and John Wiley & Sons

Fischer, G., Van Velthuizen, H., Shah, M., et Nachtergaele, F., 2002: Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results, 156 pp. pp.

Fischer, G., Shah, M., Tubiello, F. N., et van Velhuizen, H., 2005: Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **360**, 2067-2083.

Folland, C., Owen, J., Ward, M., et Colman, A., 1991: Prediction of seasonal rainfall in the Sahel region of Africa using empirical and dynamical methods. *Journal of Forecasting*, **10**, 21–56.

Frappart, F., Hiernaux, P., Guichard, F., Mougou, E., Kergoat, L., Arjounin, M., Lavenu, F., Koité, M., Paturol, J.-E., et Lebel, T., 2009: Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology*, **375**, 128-142

Gafsi, M., Dugué, P., Yamin, J., et Brossier, J., 2007: *Exploitations agricoles familiales en Afrique de l'Ouest et du Centre. Synthèses*, 472 pp.

Garcia, B. I. L., Sentelhas, P. C., Tapia, L., et Sparovek, G., 2006: Filling in missing rainfall data in the Andes region of Venezuela, based on a cluster analysis approach. *Rev. Bras. Agrometeorologia*, **14**, 225-233.

Gérard, F., Alpha, A., Beaujeu, R., Levard, L., Maître d'Hotel, E., Rouille d'Orfeuille, H., Bricas, N., Daviron, B., Galtier, F., et Boussard, J., 2011: Managing Food Price Volatility for Food Security and Development, 163 pp.

Ghannoum, O., Caemmerer, S. V., Ziska, L. H., et Conroy, J. P., 2000: The growth response of C4 plants to rising atmospheric CO2 partial pressure: a reassessment. *Plant, Cell & Environment*, **23**, 931-942.

Giannini, A., Saravanan, R., et Chang, P., 2003: Oceanic Forcing of Sahel Rainfall on Interannual to Interdecadal Time Scales. *Science*, **302**, 1027-1030.

Giné, X., Townsend, R., et Vickery, J., 2007: Statistical Analysis of Rainfall Insurance Payouts in Southern India. *American Journal of Agricultural Economics*, **89**, 1248-1254.

Griffon, M., 2006: *Nourrir la planète. Pour une révolution doublement verte*; Odile Jacob, 456 pp.

Hallegatte, S., 2009: Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change*, **16**, 240-247.

Hamatan, M., Mahe, G., Servat, É., Paturol, J.-E., et Amani, A., 2004: Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest. *Sécheresse*, **15**, 279-286.

Hansen, J. W., 2002: Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. *Agricultural Systems*, **74**, 309-330.

- Hansen, J. W., Mason, S. J., Sun, L., et Tall, A., 2011: Review of seasonal climate forecasting for agriculture in Sub-Saharan Africa. *Experimental Agriculture*, **47**, 205-240.
- Hansen, J. W., Mishra, A., Rao, K. P. C., Indeje, M., et Ngugi, R. K., 2009: Potential value of GCM-based seasonal rainfall forecasts for maize management in semi-arid Kenya. *Agricultural Systems*, **101**, 80-90.
- Hassan, R. et Nhemachena, C., 2008: Determinants of african farmers' strategies for adapting to climate change: Multinomial choice analysis. *AfJARE*, **2**, 83-104.
- Hassan, R. M., 2010: Implications of Climate Change for Agricultural Sector Performance in Africa: Policy Challenges and Research Agenda. *Journal of African Economies*, **19**, ii77-ii105.
- Hellmuth, M., Moorhead, A., Thomson, M., et Williams, J., Eds., 2007: *Gestion du risque climatique en Afrique : ce que la pratique nous enseigne*. Institut National de Recherche pour le climat et la société (IRI), 104 pp.
- Hiernaux, P., Mougou, E., Diarra, L., Soumaguel, N., Lavenu, F., Tracol, Y., et Diawara, M., 2009: Sahelian rangeland response to changes in rainfall over two decades in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology*, **375**, 114-127.
- Holt, C. A. et Laury, S. K., 2002: Risk Aversion and Incentive Effects *American Economic Review*, **92**, 1644-1655.
- Hubert, P., Carbonnel, J. P., et Chaouche, A., 1989: Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, **110**, 349-367.
- Hugon, P., 2002: L'agriculture en Afrique sub-saharienne : enjeux et perspectives *Oléagineux, Corps Gras, Lipides.*, **9**, 409-415.
- , 2006: *L'économie de l'Afrique (cinquième édition)*. La découverte, 123 pp.
- Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M., et Lister, D., 2001: African Climate Change: 1900-2100. *Climate Research*, **17**, 145-168.
- IFDC - International Fertilizer Development Center, 2004: Le Marché des Intrants au Mali, Burkina Faso et Ghana, 103 pp.
- Ingram, K. T., Roncoli, M. C., et Kirshen, P. H., 2002: Opportunities and constraints for farmers of west Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agricultural Systems*, **74**, 331-349.
- IPCC, 2007a: *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, 104 pp.
- , 2007b: *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 University Press 996 pp.
- , 2011: IPCC SREX Summary for Policymakers. First Joint Session of Working Groups I and II, 29 pp.

Jones, P. G. et Thornton, P. K., 2003: The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change*, **13**, 51-59.

Jouve, P., 2010: Pratiques et stratégies d'adaptation des agriculteurs aux aléas climatiques en Afrique subsaharienne. *Revue Grain de sel*, **49**, 15-18.

Kandji, S., Verchot, L., et Mackensen, J., 2006: Climate Change and Variability in the Sahel Region: Impacts and Adaptation Strategies in the Agricultural Sector, 58 pp.

Kniveton, D. R., Layberry, R., et Williams Mika Peck, C. J. R., 2008: Trends in the start of the wet season over Africa. *International Journal of Climatology*.

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.

Kouressy, M., Dingkuhn, M., Vaksman, M., et Heinemann, A. B., 2008: Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agricultural and Forest Meteorology*, **148**, 357-371.

Kurukulasuriya, P. et Mendelsohn, R., 2007: A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on African Cropland.

—, 2008: A Ricardian analysis of the impact of climate change on African cropland. *AfJARE* **2**.

L'hôte, Y., Mahé, G., Some, B., et Triboulet, J., 2002: Analysis of a sahelian rainfall index from 1896 to 2000: the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, **47**, 563-572.

Lamachere, J. M., 1991: Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage. *IAHS Publ.*, **199**, 109-119.

Laux, P., Kunstmann, H., et Bardossy, A., 2008: Predicting the regional onset of the rainy season in West Africa. *International Journal of Climatology*, **28**, 329-342.

Leakey, A. D. B., 2009: Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **276**, 2333-2343.

Lebel, T. et Ali, A., 2009: Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, **375**, 52-64.

Letson, D., Laciána, C. E., Bert, F. E., Weber, E. U., Katz, R. W., Gonzalez, X. I., et Podestá, G. P., 2009: Value of perfect ENSO phase predictions for agriculture: evaluating the impact of land tenure and decision objectives. *Climatic Change*, **97**, 145-170.

Liu, J., Fritz, S., van Wesenbeeck, C. F. A., Fuchs, M., You, L., Obersteiner, M., et Yang, H., 2008: A spatially explicit assessment of current and future hotspots of hunger in Sub-Saharan Africa in the context of global change. *Global and Planetary Change*, **64**, 222-235.

Lobell, D. B. et Burke, M. B., 2010: On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, **150** 1443-1452.

Lobell, D. B., Burke, M. B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M. D., Falcon, W. P., et Naylor, R. L., 2008: Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science*, **319**, 607-610.

- Long, S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D. B., et Morgan, P. B., 2006: Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*, **312**, 1918-1921.
- Luseno, W. K., McPeak, J. G., Barrett, C. B., Little, P. D., et Gebru, G., 2003: Assessing the Value of Climate Forecast Information for Pastoralists: Evidence from Southern Ethiopia and Northern Kenya. *World Development*, **31**, 1477-1494.
- Mahé, G. et Paturel, J.-E., 2009: 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *C. R. Geoscience*, **341**, 538–546.
- Mall, R., Singh, R., Gupta, A., Srinivasan, G., et Rathore, L., 2007: Impact of climate change on Indian agriculture: a review. *Climatic Change*, **82**, 225-231.
- Marteau, R., 2010: Cohérence spatiale et prévisibilité potentielle des descripteurs intrasaisonniers de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne: application à la culture du mil dans la région de Niamey, Université de Bourgogne, 242.
- Marteau, R., Moron, V., et Philippon, N., 2009: Spatial Coherence of Monsoon Onset over Western and Central Sahel (1950–2000). *Journal of Climate*, **22**, 1313-1324.
- Marteau, R., Sultan, B., Baron, C., Traoré, S., Agali, A., et Moron, V., 2011: The onset of the rainy season and the farmers' sowing strategy for pearl millet cultivation in Southwest Niger. *Agricultural and Forest Meteorology*.
- Meinke, H., Stone, R. C., Salinger, J., Sivakumar, M. V. K., et Motha, R. P., 2005: Seasonal and Inter-Annual Climate Forecasting: The New Tool for Increasing Preparedness to Climate Variability and Change in Agricultural Planning and Operations Increasing Climate Variability and Change. Springer Netherlands, 221-253.
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., et Shaw, D., 1994: The impact of global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *American Economic Review*, **84**, 753-771.
- Mertz, O., Mbow, C., Reenberg, A., et Diouf, A., 2009: Farmers' Perceptions of Climate Change and Agricultural Adaptation Strategies in Rural Sahel. *Environmental Management*, **43**, 804–816.
- Mertz, O., Mbow, C., Nielsen, J., Maiga, A., Diallo, D., Reenberg, A., Diouf, A., Barbier, B., Bouzou Moussa, I., Zorom, M., Ouattara, I., et D., D., 2010: Climate factors play a limited role for past adaptation strategies in West Africa. *Ecology and Society*, **15**.
- Meza, F. J., Hansen, J. W., et 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 and Climatology*, **47**, 1269-1286.
- Molua, E. L., 2009: An empirical assessment of the impact of climate change on smallholder agriculture in Cameroon. *Global and Planetary Change*, **67**, 205-208.
- Monfreda, C., Ramankutty, N., et Foley, J. A., 2008: Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochem. Cycles*, **22**, GB1022.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Vuuren, D. P. v., Carter, T. R., Seita Emori, Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.

- J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., et Wilbanks, T. J., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, **463** 747-756
- Msangi, S., Rosegrant, M. W., et You, L., 2006: Ex post assessment methods of climate forecast impacts, **33**, 67–79.
- Müller, C., Cramer, W., Harea, W., et Lotze-Campen, H., 2011: Climate change risks for African agriculture. *PNAS*, **Early edition**.
- Müller, C., Bondeau, A., Popp, A., Waha, K., et Fader, M., 2010: Climate change impacts on agricultural yields. Background note to the World Development Report 2010, 11 pp pp.
- Nelson, G. C., Rosegrant, M., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Msangi, S., Ringler, C., Palazzo, A., Batka, M., Magalhaes, M., et Lee, D., 2009: Climate Change: Impact on agriculture and costs of adaptation.
- New, M., Hewitson, B., Stephenson, D. B., Tsiga, A., Kruger, A., Manhique, A., Gomez, B., Coelho, C. A. S., Masisi, D. N., Kululanga, E., Mbambalala, E., Adesina, F., Saleh, H., Kanyanga, J., Adosi, J., Bulane, L., Fortunata, L., Mdoka, M. L., et Lajoie, R., 2006: Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa. *J. Geophys. Res.*, **111**, D14102.
- Nhemachena, C., Hassan, R., et Kurukulasuriya, P., 2010: Measuring the Economic Impact of Climate Change on African Agricultural Production Systems. *Climate Change Economics*, **1**, 35-55.
- Nicholson, S., 2005: On the question of the "recovery" of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments*, **63**, 615-641.
- Nielsen, J. Å. et Reenberg, A., 2010: Temporality and the problem with singling out climate as a current driver of change in a small West African village. *Journal of Arid Environments*, **74**, 464-474.
- Ntare, B. R., Diallo, A., Ndjeunga, J., et Waliyar, F., sans date: Manuel sur les techniques de production de semences d'arachide, 29 pp.
- O'Brien, K., Sygna, L., Næss, L. O., Kingamkono, R., et Hochobeb, B., 2000: Is Information Enough? User Responses to Seasonal Climate Forecasts in Southern Africa, 1-72 pp.
- Oettli, P., Sultan, B., Baron, C., et Vrac, M., 2011: Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa? *Environmental Research Letters*, **6**, 014008.
- Ogurtsov, V. A., Van Asseldonk, M. P. A. M., et Huirne, R. B. M., 2008: Assessing and modelling catastrophic risk perceptions and attitudes in agriculture: a review. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, **56**, 39-58.
- ONUSIDA, 2008: Rapport sur l'épidémie mondiale de SIDA, 362 pp.
- Organisation des Nations Unies, 2007: Perspectives de la population mondiale. La Révision de 2006. Résumé, 21 pp.
- Ouédraogo, M., Dembélé, Y., et Somé, L., 2010: Perceptions et stratégies d'adaptation aux changements des précipitations : cas des paysans du Burkina Faso. *Sécheresse*, **21**, 87-96.
- Paeth, H., Capo-Chichi, A., et Endlicher, W., 2008: Climate Change and food security in tropical West Africa - a dynamic-statistical modelling approach. *Erdkunde*, **62**, 101-115.

- Paeth, H., Hall, N. M. J., Gaertner, M. A., Alonso, M. D., Moumouni, S., Polcher, J., Ruti, P. M., Fink, A. H., Gosset, M., Lebel, T., Gaye, A. T., Rowell, D. P., Moufouma-Okia, W., Jacob, D., Rockel, B., Giorgi, F., et Rummukainen, M., 2011: Progress in regional downscaling of west African precipitation. *Atmospheric Science Letters*, **12**, 75-82.
- Parry, M. L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M., et Fischer, G., 2004: Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, **14**, 53-67.
- Patricola, C. et Cook, K., 2009: Northern African climate at the end of the twenty-first century: an integrated application of regional and global climate models. *Climate Dynamics*, **35**, 193-212.
- Patt, A., Suarez, P., et Gwata, C., 2005: Effects of seasonal climate forecasts and participatory workshops among subsistence farmers in Zimbabwe. *PNAS*, **102**, 12623-12628.
- Paturel, J. E. et Ouedraogo, M., 2003: The concept of rainfall and stream flow normals in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological sciences journal* **48**, 125-137.
- Pinkovskiy, M. et Sala-i-Martin, X., 2010: African Poverty is Falling...Much Faster than You Think! , Massachusetts Institute of Technology & Columbia University, 38 pp.
- Pope, R. et Just, R., 1991: On testing the structure of risk preferences in agricultural supply system. *American Journal of Agricultural Economics*, **73**, 743-748.
- Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fichet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R. J., Sumi, A., et Taylor, K. E., 2007: Climate models and their evaluation. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, Eds., Cambridge University Press.
- Romero, R., Guijarro, J., et Alonso, S., 1998: A 30 year (1964-1993) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: first exploratory study. *International Journal of Climatology*, **18**, 541-560.
- Roncoli, C., 2006: Ethnographic and participatory approaches to research on farmers' responses to climate predictions. *Climate Research*, **33**, 81-99.
- Roncoli, C., Ingram, K., et Kirshen, P., 2002: Reading the rains: Local knowledge and rainfall forecasting in Burkina Faso. *Society & Natural Resources*, **15**, 409-427.
- Roncoli, C., Jost, C., Kirshen, P., Sanon, M., Ingram, K. T., Woodin, M., Somé, L., Ouattara, F., Sanfo, B. J., Sia, C., Yaka, P., et Hoogenboom, G., 2009: From accessing to assessing forecasts: an end-to-end study of participatory climate forecast dissemination in Burkina Faso (West Africa). *Climatic change*, **92**, 433-460.
- Roudier, P. et Mahe, G., 2009: Study of water stress and droughts with indicators using daily data on the Bani river (Niger basin, Mali). *International Journal of Climatology*, **30**, 1689-1705.
- Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P., et Berg, A., 2011a: The impact of future climate change on West African crop yields: what does the recent literature say? *Global Environmental Change*, **21**, 1073-1083.

- Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P., Baron, C., Alhassane, A., Traoré, S., et Muller, B., 2011b: An ex-ante evaluation of the use of seasonal climate forecasts for millet growers in SW Niger *International Journal of Climatology*.
- Salack, S., 2006: Impacts des changements climatiques sur la production du mil et du sorgho dans les sites pilotes du plateau central, de Tahoua et de Fakara, 33 pp.
- Salack, S., Muller, B., et Gaye, A., 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*, **106**, 1-22.
- Samba, A., 1998: Les logiciels DHC de diagnostic hydrique des cultures. Préviation des rendements du mil en zones soudano-sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest. *Sécheresse*, **9**, 281-288.
- Schechter, L., 2007: Risk aversion and expected-utility theory: A calibration exercise *Journal of Risk and Uncertainty*, **35**, 67-76.
- Schlenker, W. et Lobell, D. B., 2010: Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, **5**, 1-8.
- SCSAO (Secrétariat du Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest), 2005: Économie familiale et innovation agricole en Afrique de l'ouest : vers de nouveaux partenariats, 106 pp.
- Seck, P. A. et Ba, C. O., 2002: L'agriculture africaine n'est pas condamnée *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, **9**, 464-467.
- Seo, S., Mendelsohn, R., Dinar, A., Hassan, R., et Kurukulasuriya, P., 2009: A Ricardian Analysis of the Distribution of Climate Change Impacts on Agriculture across Agro-Ecological Zones in Africa. *Environmental and Resource Economics*, **43**, 313-332.
- Severino, J.-M. et Ray, O., 2010: *Le temps de l'Afrique*. Odile Jacob, 345 pp.
- Sivakumar, M. et Hansen, J. W., 2007: Climate prediction and agriculture: summary and the way forward. *Climate prediction and agriculture: advances and challenges*, M. Sivakumar and J. W. Hansen, Eds., Springer.
- Sivakumar, M. V. K., 1988: Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, **42**, 295-305.
- , 1992: Empirical-Analysis of Dry Spells for Agricultural Applications in West Africa. *Journal of Climate*, **5**, 532-539.
- Smith, J. B., Huq, S., Lenhart, S., Mata, L. J., Nemesova, I., et Toure, S., 1996: *Vulnerability and Adaptation to Climate Change: Interim Results from the U.S. Country Studies Program*. Kluwer Academic Publishers.
- Soler, C. M. T., Maman, N., Zhang, X., Mason, S. C., et Hoogenboom, G., 2008: Determining optimum planting dates for pearl millet for two contrasting environments using a modelling approach. *J. Agricultural Science*, **146**, 445-459.

- Soumaré, M., Kouressy, M., Vaksman, M., Maikano, I., Bazile, D., Traoré, P. S., Traoré, S., Dingkuhn, M., Touré, A., Brocke, K. V., Somé, L., et Barro-Kondombo, C. P., 2008: Prédiction de l'aire de diffusion des sorghos photopériodiques en Afrique de l'Ouest *Cahiers Agricultures.*, **17**, 160-164.
- Sultan, B., 2002: Etude de la mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. Applications à la sensibilité des rendements agricoles., University Paris VII - Denis Diderot, 283 pp.
- Sultan, B. et Janicot, S., 2003: The West African monsoon dynamics. Part II : The "pre-onset" and the "onset" of the summer monsoon. *Journal of Climate*, **16**, 3407-3427.
- Sultan, B., Baron, C., Dingkuhn, M., Sarr, B., et Janicot, S., 2005: Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology*, **128**, 93-110.
- Sultan, B., Barbier, B., Fortilus, J., Mbaye, S. M., et Leclerc, G., 2010: Estimating the Potential Economic Value of Seasonal Forecasts in West Africa: A Long-Term Ex-Ante Assessment in Senegal. *Weather, Climate, and Society*, **2**, 69-87.
- Tarhule, A. et Lamb, P. J., 2003: Climate research and seasonal forecasting for West Africans - Perceptions, dissemination, and use? *Bulletin of the American Meteorological Society*, **84**, 1741-1759.
- Taub, D. R., Miller, B., et Allen, H., 2008: Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Global Change Biology*, **14**, 565-575.
- Teegavarapu, R. S. V. et Chandramouli, V., 2005: Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology* **312**, 191-206.
- Thornton, P., Jones, P., Owiyo, T., Kruska, R., Herrero, M., Kristjanson, P., Notenbaert, A., Bekele, N., Omolo, A., Orindi, V., Otiende, B., Ochieng, A., Bhadwal, S., Anantram, K., Nair, S., Kumar, V., et Kulkar, U., 2006: Mapping climate vulnerability and poverty in Africa, 171 pp.
- Thornton, P. K., Jones, P. G., Ericksen, P. J., et Challinor, A. J., 2011: Agriculture and food systems in sub-Saharan Africa in a 4°C+ world. *Phil. Trans. R. Soc. A* **369**, 117-136.
- Tingem, M. et Rivington, M., 2009: Adaptation for crop agriculture to climate change in Cameroon: Turning on the heat. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **14**, 153-168.
- Traoré, P., Kouressy, M., Vaksman, M., Tabo, R., Maikano, I., Traoré, S., et Cooper, P., 2007: Climate Prediction and Agriculture: What Is Different about Sudano-Sahelian West Africa? *Climate Prediction and Agriculture*, 189-203.
- Traore, P. C. S., Kouressy, M., Vaksman, M., Tabo, R., Maikano, I., Traore, S. B., et Cooper, R., 2007: Climate prediction and agriculture: What is different about Sudano-Sahelian West Africa? *Climate Prediction and Agriculture: Advances and Challenges*, M. V. K. Sivakumar and J. W. Hansen, Eds., Springer Berlin Heidelberg, 189-203.
- Traoré, S., Alhassane, A., Muller, B., Kouressy, M., Somé, L., Sultan, B., Oettli, P., Laopé, A. C. S., Sangaré, S., Vaksman, M., Mbaye Diop, Dingkhun, M., et Baron, C., 2011: Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. *Atmospheric science letters*, **12**.

- Traoré, S. B., Reyniers, F., Vaksman, M., Koné, B., Sidibé, A., Yoroté, A., Yattara, K., et Kouressy, M., 2000: Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorghos du Mali. *Sécheresse*, **11**, 227-237.
- Tubiello, F. N., Soussana, J. F., et Howden, M., 2007a: Crop and pasture response to climate change. *PNAS*, **104**, 19686-19690.
- Tubiello, F. N., Amthor, J. S., Boote, K. J., Donatelli, M., Easterling, W., Fischer, G., Gifford, R. M., Howden, M., Reilly, J., et Rosenzweig, C., 2007b: Crop response to elevated CO₂ and world food supply: A comment on "Food for Thought..." by Long et al., *Science* 312:1918-1921, 2006. *European Journal of Agronomy*, **26**, 215-223.
- Vaksman, M. et Traoré, S., 1994: Adéquation entre risque climatique et choix variétal du mil. Cas de la zone de Bankass au Mali. *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale*, J. L. Eurotext, Ed.
- Van der Zaag, P., 2010: Water variability, soil nutrient heterogeneity and market volatility – Why sub-Saharan Africa's Green Revolution will be location-specific and knowledge-intensive. *Water Alternatives*, **3**, 154-160.
- van Wesenbeeck, C. F., Keyzer, M. A., et Nubé, M., 2009: Estimation of undernutrition and mean calorie intake in Africa: methodology, findings and implications. *International Journal of Health Geographics* **8**.
- Vanduivenbooden, N., Abdousallam, S., et Ben Mohamed, A., 2002: Impact of climate change on agricultural production in the Sahel - Part 2. case study for groundnut and cowpea in Niger. *Climatic Change*, **54**, 349-368.
- Vigaud, N., Roucou, P., Fontaine, B., Sijkumar, S., et Tyteca, S., 2009: WRF/ARPEGE-CLIMAT simulated climate trends over West Africa. *Climate Dynamics*, **36**, 925-944.
- Vörösmarty, C. J., Douglas, E. M., Green, P. A., et Revenga, C., 2005: Geospatial indicators of emerging water stress : an application to Africa. *Ambio*, **34**, 230-237.
- Wakker, P. P., 2008: Explaining the characteristics of the power (CRRA) utility family. *Health Economics*, **17**, 1329–1344.
- Ward, M., 1998: Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical north Africa at interannual and multidecadal timescales. *Journal of Climate*, **11**, 3167–3191.
- Ward, N., Cook, K., Diedhiou, A., Fontaine, B., Giannini, A., Kamga, A., Lamb, P., Ben Mohamed, A., Nassor, A., et Thorncroft, C., 2004: Seasonal-to-decadal predictability and prediction of West African climate. *CLIVAR Exchanges* **9**, 14-20.
- West, C. T., Roncoli, C., et Ouattara, F., 2008: Local perceptions and regional climate trends on the Central Plateau of Burkina Faso. *Land Degradation & Development*, **19**, 289-304.
- Winkel, T., Renno, J.-F., et Payne, W. A., 1997: Effect of the timing of water deficit on growth, phenology and yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) grown in Sahelian conditions. *Journal of Experimental Botany*, **48**, 1001-1009.
- Zavala, J. A., Casteel, C. L., DeLucia, E. H., et Berenbaum, M. R., 2008: Anthropogenic Increase in Carbon Dioxide Compromises Plant Defense against Invasive Insects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**, 5129-5133.

Ziervogel, G. et Opere, A., 2010: Intégration des données météorologiques et du savoir autochtone aux prévisions climatiques saisonnières pour le secteur agricole, 24 pp.

Ziervogel, G., Bithell, M., Washington, R., et 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.

Zorita, E. et Von Storch, H., 1999: The Analog Method as a Simple Statistical Downscaling Technique: Comparison with More Complicated Methods. *Journal of Climate*, **12**, 2474-2489.

ANNEXES

1. Annexe 1 : calcul du False Alarm Rate (FAR) et Hit Rate (HR), selon l'ECWMF

Pour évaluer un type de prévision (par exemple la prévision de la classe de pluie ">10mm", on peut utiliser un tableau de contingence (Tableau 40) dénombrant les prévisions réussies (H pour "hits"), les fausses alarmes (F pour "False alarm"), les erreurs (M pour "Misses") et les non-événements correctement prédits (Z pour "correct no-forecasts"). A partir de cette table, on peut calculer le $HR=H/(H+M)$ et le $FAR=F/(Z+F)$.

	Événements observés	Événements non-observés
Événements prévus	H	F
Événements non prévus	M	Z

Tableau 40: tableau de contingence pour évaluer une prévision

2. Annexe 2: détails des projections (GCMs et scénarii SRES utilisés)

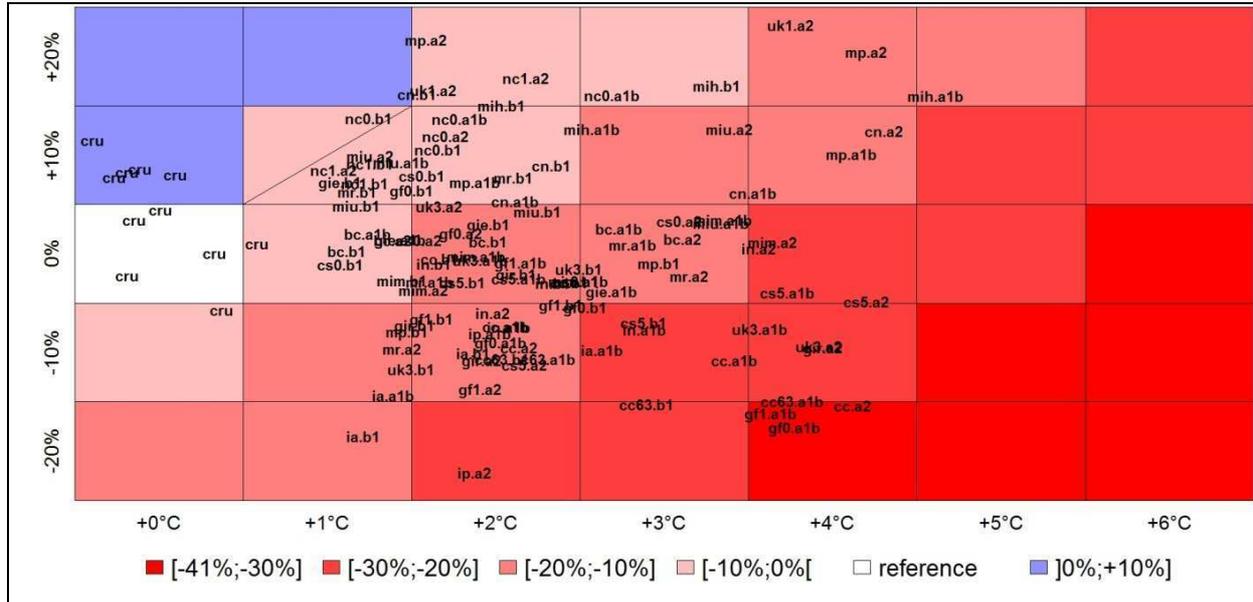
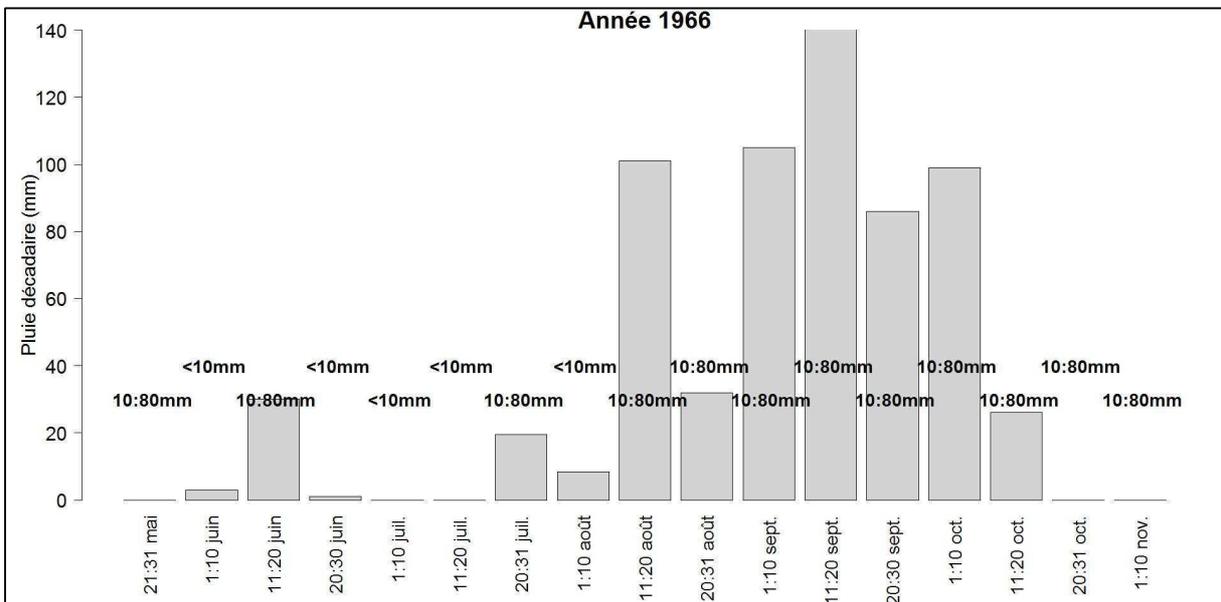
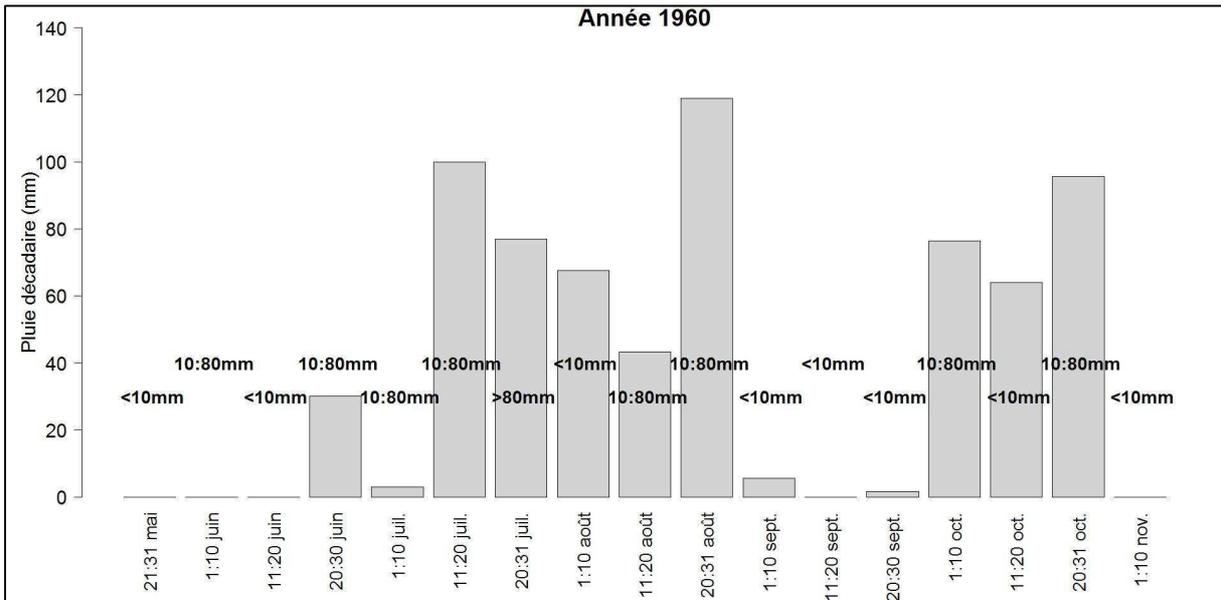


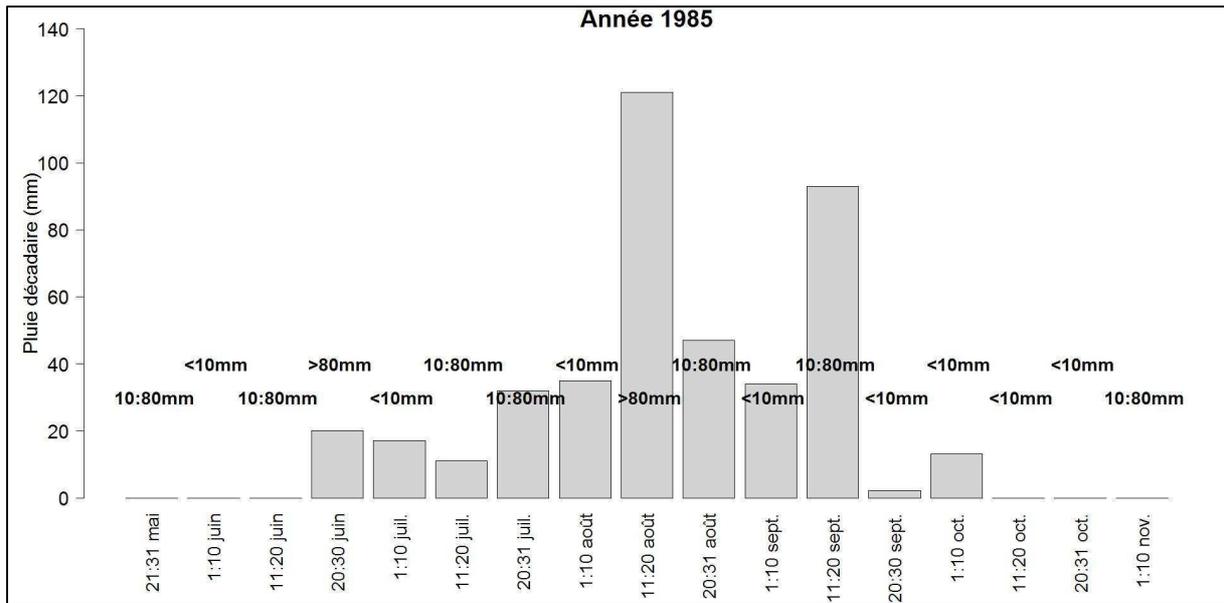
Figure 82: Changement de rendement moyen par rapport à la période 1961-1990 en fonction des anomalies de températures (abscisses) et de précipitations (ordonnées). Les anomalies observées dans le passé et projetées pour le futur sont exposées sur le graphique sur une base décennale pour les observations du CRU et pour deux horizons temporels futurs 2031-2050 et 2071-2090. Le rendement est moyenné sur les 6 variétés considérées et sur les 35 stations disponibles. Le graphique indique le nom du modèle (voir signification des abréviations au chapitre 1) et du scénario SRES. Les cases avec un trait transversal indiquent les différences non significatives à 5%.

3. Annexe 3 : pluviométrie des 7 années choisies et prévisions décadaires données aux agriculteurs (" $< 10\text{mm}$ " ; " $10:80\text{ mm}$ " ; " $>80\text{ mm}$ ")

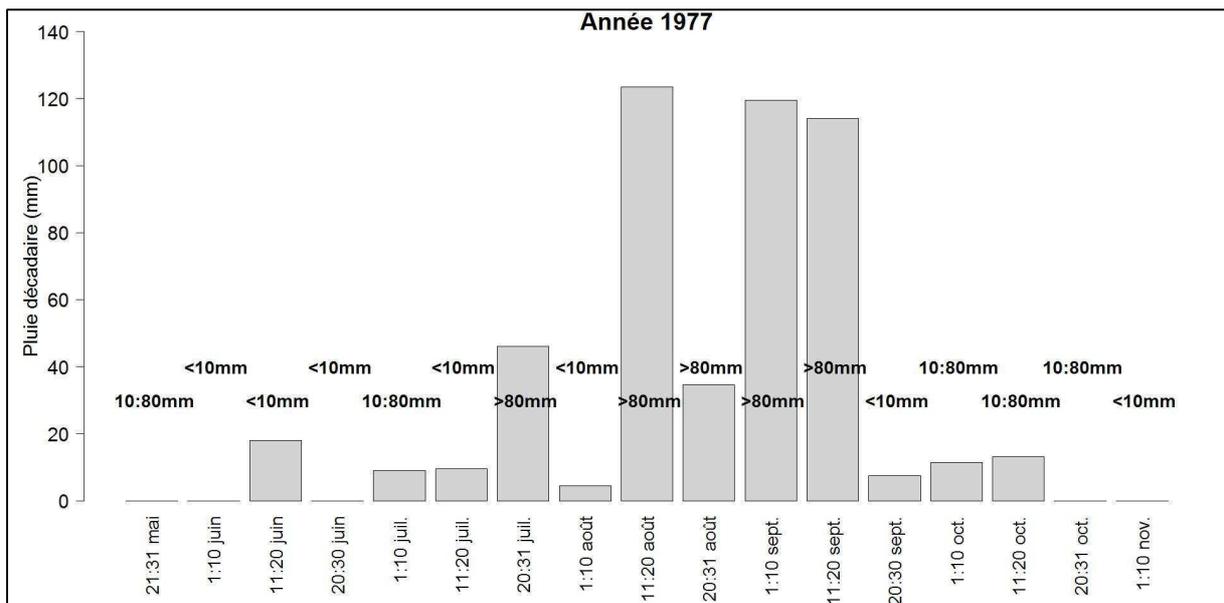
3.1 Bacfassagal



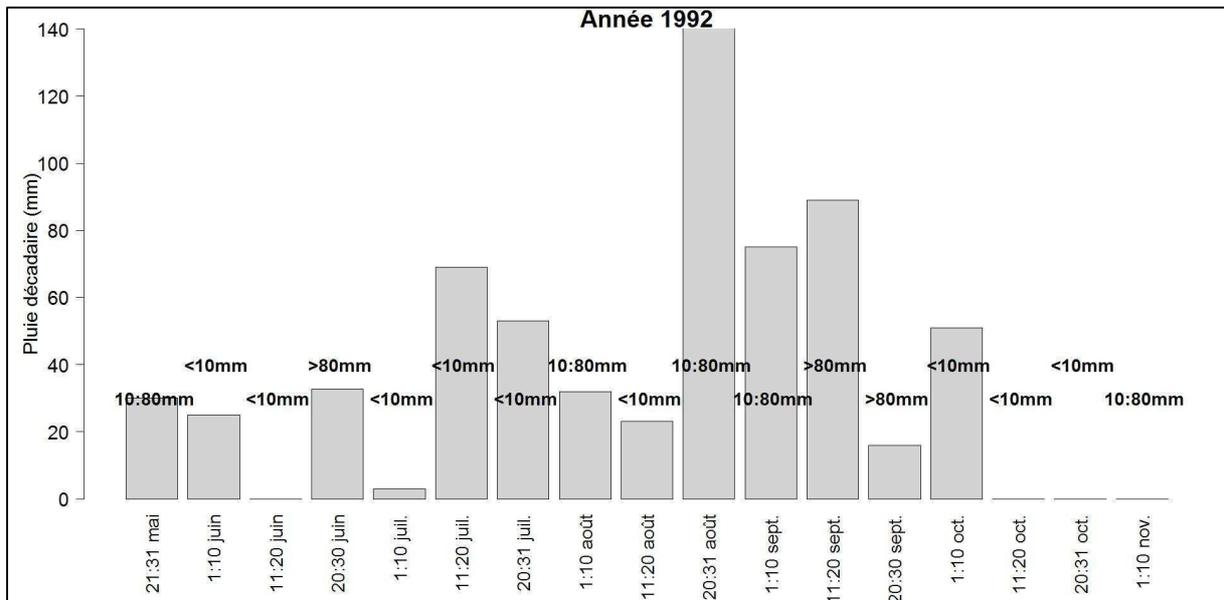
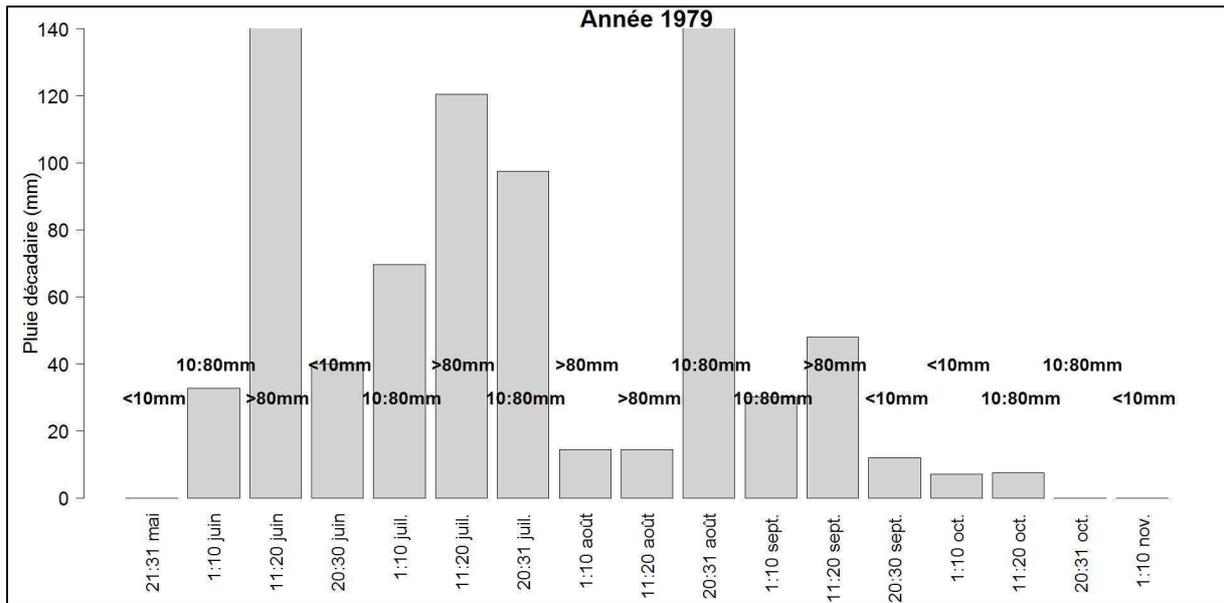
Annexes



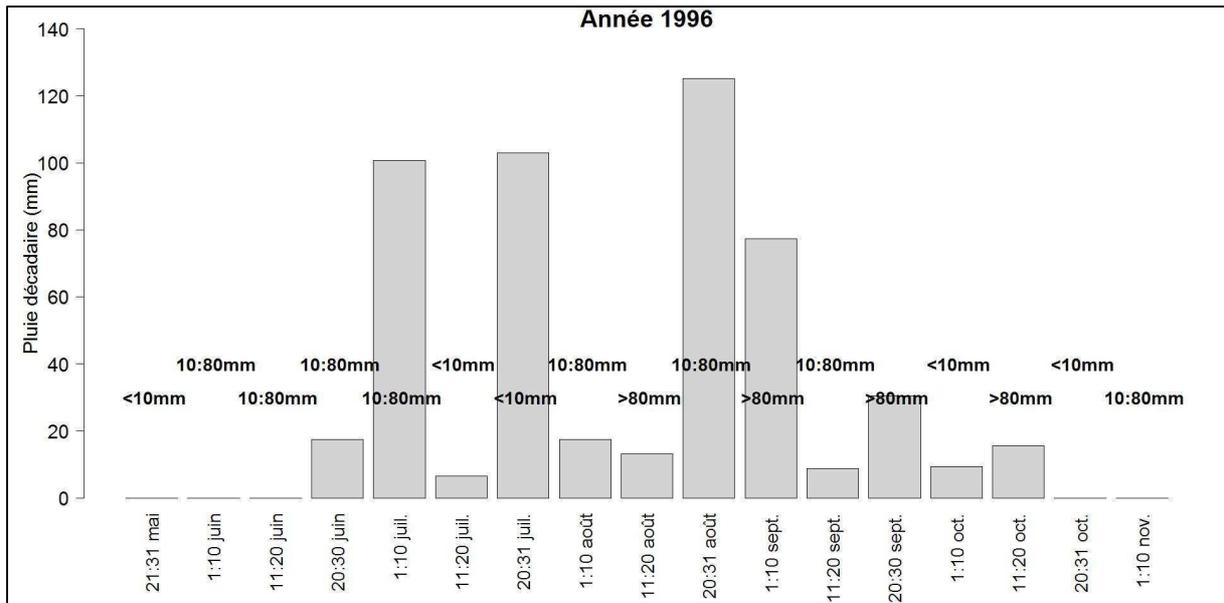
3.2 Paoskoto



Annexes



Annexes



4. Annexe 4 : questionnaire individuel type utilisé à Paoskoto

1° Présentation du participant

- Nom et numéro du participant: Sexe:
- Age:
- Ethnie : Niveau d'éducation (0/1/2) :
- Taille du foyer: nombre d'actifs:
- Responsabilités (traditionnelles, politiques, associatif, religieux, etc) :
- Activité principale/secondaires :
- Possédez vous? Une TV : une radio: un tél. portable:

2° Description de l'exploitation

- Membre de la coop?: depuis:
- Taille totale de l'exploitation (et part de semencier):
- Principales cultures et Ha cultivés en 2010 : Mil : Sorgho :
- Maïs :
- Arachide : Niébé : Pastèque : Bissap :
- Autres :
- Combien de têtes de bétail possédées?
- Ane: Chèvre: Mouton: Bovins: Cheval:
- Volaille:
- Matériel agricole (en propriété) (nombre et année acquisition) : Sarclo-bineuse (houe sine) :
- Charrue (type ?) : Semoir : Charrette :
- Autres :
- Matériel agricole emprunté/loué :
- Utilisation d'engrais chimiques? Sur quelle culture ?
- Utilisation autres produits ? (désinfectant semence, herbicide, insecticide, fongicide etc..)
- Utilisation semences qualité/certifiées ?
- Fait appel à tracteur ?
- Origines des revenus (et % ou « peu », « moyen », « beaucoup » ?) : Agriculture :
- Ventes produits élevage : Autre métier / autre activité :
- Famille ailleurs au Sénégal ou à l'étranger : Autres ?:

3° Connaissance des prévisions

-Connaissance auparavant de ce type de prévision?

-Si oui, par quel moyen?

Si oui, l'utilisez-vous?

-Moyens de prévisions habituellement employés?

-Ces moyens fonctionnent-ils bien?

4° Appréciation des ateliers

Etes vous satisfait des ateliers?

Ce type de prévision vous semble-t-il intéressant? Pourquoi?

Que pourrions nous changer pour rendre les ateliers plus intéressants?

5. Annexe 5 : questionnaire individuel corrigé après les ateliers

1° Présentation du participant

- Nom du participant: _____ Sexe: _____ Age: _____
- Ethnie : _____ Niveau d'éducation (0/1/2/3) : _____
- Taille du foyer: _____ nombre d'actifs: _____
- Activité principale/secondaires : _____
- Nombre de (possession): TV : _____ radio: _____ tél. portable: _____

2° Description de l'exploitation (1ligne/champ, en 2010)

Culture	Variétés	Brousse/case	Deck/dior	Fumure?	Engrais?	Pesticides?	Superficie

- Dépenses intrants/an (pesticides+engrais) 2010: _____
- Dépenses semences/an : _____
- Combien de têtes de bétail possédées? _____
- Fait appel à tracteur ? _____
- Origines des revenus (et % ou « peu », « moyen », « beaucoup » ?) : _____
- Agriculture : _____
- Ventes produits élevage : _____
- Famille: _____ Autres: _____

3° Connaissance des prévisions

- Les prévisions **météo**:

Type de prévi météo	Connue?	Comment? (Radio...?)	Utilisée?	Efficace?(note 1 à 5)
Journalière				
Décadaire				
Saisonnaire (cumul JJA)				

-Les prévisions **traditionnelles** (ex oiseaux, étoiles...):

Types de prévision traditionnelles	Utilisée?	Efficace? (note de 1 à 5)

-Faites vous plus confiance aux prévisions traditionnelles ou météo?

-Noter les informations météo selon leur pertinence (1: "pas du tout", 5: "très"):

Echelle temporelle	Paramètre	Note
Saisonnaire (1 info/saison, en mai)	Date 1ère pluie efficace pour semis	
	Date dernière pluie >20mm	
	Date sécheresse >10j	
	Cumul global JJA (catégories)	
	Date Pluie >80mm	
	Température globale (catégories)	
Décadaire (tous les 10j, sur 10j)	Catégorie de pluie	
	Catégorie de température	
	Catégorie de vent	

*Sur la prévision du cumul de la saison JJA (type PRESAO)

-Pensez-vous que c'est utile?

-Comment pourriez-vous y réagir?

6. Annexe 6: poster (version française) réalisé pour informer les participants des ateliers sur l'utilisation de leur travail

