

Université Pierre et Marie Curie

*L'étude des variations et du
changement climatique en Afrique de
l'Ouest et ses retombées sociétales*

Benjamin Sultan

Habilitation à diriger des recherches

Soutenue oralement le 20 Juin 2011 devant le jury composé de :

Laurence Picon (LMD)	Présidente
Sylvain Bigot (LTHE)	Rapporteur
Wolfgang Cramer (PIK)	Rapporteur
Sylvie Joussaume (LSCE)	Rapporteur
Christian Baron (CIRAD)	Examineur
Serge Janicot (LOCEAN)	Examineur
Eric Servat (HSM)	Examineur

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les étudiants et jeunes chercheurs dont j'ai encadré de près ou de loin le travail de master (Cyrille Correia, Jeanne-Marie-Rose Fortilus, Karima Labadi), de thèse (Marthe Bella Medjo, Philippe Roudier, Alexis Berg, Pascal Yaka, Romain Marteau, Alhassane Agali, Abdou Karim Gueye, Seyni Salack) ou de post-doc (Pascal Oettli, Henning Rust, Matthieu Guimberteau). Ils ont contribué de façon importante aux résultats présentés dans ce manuscrit et je leur souhaite bonne chance pour la suite de leur carrière.

Je remercie également les membres du jury pour leurs conseils et leur disponibilité.

Mes pensées vont également à tous les collègues avec qui j'ai eu le plaisir de travailler et d'interagir: Christian Baron, Michael Dingkuhn, Bertrand Muller et Bruno Barbier (CIRAD), Seydou Traoré et Benoit Saar (AGRHYMET), Arona Diedhiou (LTHE), Nathalie de Noblet-Ducoudré et Mathieu Vrac (LSCE), Vincent Moron (CEREGE), Bernard Fontaine et Nathalie Philippon (CRC), Philippe Quirion (CIRED), Rémy Roca, Karim Ramage, Frédéric Hourdin (LMD), Pascal Terray et Matthieu Lengaigne (LOCEAN), Hélène Broutin et Jean-François Guégan (MIVEGEC), Gil Mahé (HSM). Et j'en oublie forcément.

Je remercie plus particulièrement Serge Janicot (LOCEAN) qui a toujours su me guider depuis toutes ces années pour mener mon travail de recherche.

Je voudrais aussi remercier les directeurs du LOCEAN, successivement Pierre Soler et Laurence Eymard pour avoir permis d'ouvrir les thématiques du LOCEAN vers les aspects sociétaux qui sont au cœur de mon projet de recherche.

Un grand merci également à tous les instigateurs du programme AMMA dont j'ai pu profiter de l'extraordinaire dynamique qui j'espère continuera longtemps. En souhaitant longue vie à AMMA-2 !

Enfin, je voudrais remercier l'équipe du secrétariat au LOCEAN pour son soutien extrêmement précieux à la gestion de la recherche au quotidien.

Ce travail est surtout dédié à Florence, Sacha et à Albert, mon plus grand fan...

Avant propos

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches fait le point sur les travaux que j'ai menés depuis le début de mon doctorat en 1999. Ces travaux se sont inscrits dans un parcours pluridisciplinaire qui m'a fait découvrir la climatologie, l'agronomie, l'épidémiologie, l'économie, plus récemment les sciences humaines et bien-sûr l'Afrique de l'Ouest. Les deux premières années de ma thèse au LMD, sous la direction de Serge Janicot et de Pascal Terray, ont été consacrées à l'étude du climat africain que je décrirai dans le chapitre 2. Au cours d'une réunion du projet européen PROMISE qui finançait ma thèse, j'ai rencontré Christian Baron et Michael Dingkuhn, agronomes au CIRAD, qui tentaient de coupler leur modèle agronomique SARRAH avec les sorties du modèle de climat ARPEGE. L'exercice était ardu car ARPEGE avait alors un biais dans la position de la zone de convergence intertropicale localisée trop au Sud et il était impossible de faire pousser du mil dans le désert qu'était le Sahel dans le modèle. Ils avaient alors pris la liberté de décaler de deux degrés vers le Nord la zone de convergence intertropicale dans les simulations climatiques, sous les yeux effarés des climatologues, et montré que ça marchait très bien avec « cette petite correction ». Au-delà de cette anecdote, c'est à l'issue de cette réunion que j'ai entamé une collaboration avec les agronomes du CIRAD pendant la dernière année de ma thèse et qui s'est poursuivie lors de mon séjour postdoctoral au CIRAD. Dès lors, mon travail a consisté non pas à me spécialiser dans l'étude du climat ou de l'agronomie mais à mettre en dialogue ces deux disciplines, en apportant la connaissance du climat nécessaire pour l'étude des impacts agronomiques et en retour en orientant mes recherches sur le climat vers les variables pertinentes pour l'agronomie. J'ai alors été recruté à l'IRD en 2004 au LOCEAN pour mener cette recherche à l'interface entre le climat et l'agronomie que je détaillerai dans le chapitre 4. Au cours de mon parcours, j'ai également joué ce rôle d'interface en orientant mes travaux sur les liens entre le climat et la santé, que je décrirai dans le chapitre 3, en travaillant avec l'équipe de Jean-François Guégan, épidémiologiste de l'IRD au GEMI (aujourd'hui MIVEGEC). Aujourd'hui je souhaite me focaliser davantage sur le climat et l'agriculture à travers plusieurs pistes détaillées dans le chapitre 5 en essayant cette fois d'intégrer la dimension humaine qui a été la grande absente de mes travaux de recherche.

Table des matières

1. Le contexte de mes recherches	11
1.1 Une vulnérabilité face aux variations et au changement climatique.....	13
1.2 Une mobilisation pluridisciplinaire nécessaire.....	14
1.3 Les objectifs de mon travail de recherche	15
1.4 Plan du manuscrit.....	17
2. La mousson en Afrique de l’Ouest aux échelles saisonnière et intra-saisonnière.....	19
2.1 Les grands traits de la mousson africaine	22
2.2 Le cycle saisonnier de la mousson.....	25
2.2.1 La mise en place de la mousson	25
2.2.2 Le démarrage de la saison des pluies.....	27
2.2.3 Les mécanismes associés à la mise en place de la mousson.....	29
2.2.4 Cycle diurne et mise en place de la mousson	30
2.2.5 Orientation de la SOP en 2006	30
2.2.6 Perspectives.....	31
2.3 La variabilité intra-saisonnière	32
2.3.1 La variabilité intra-saisonnière à 10-25 jours.....	33
2.3.2 La variabilité intra-saisonnière à 25-90 jours.....	37
2.3.3 La prévisibilité des fluctuations intra-saisonnières	38
2.3.4 Perspectives.....	39
3. Les impacts du climat sur les épidémies de méningites en Afrique de l’Ouest	41
3.1 La méningite et l’environnement.....	43
3.2 La dynamique saisonnière de la méningite.....	45
3.3 Les variations interannuelles des épidémies.....	48
3.4 Conclusions, limites et perspectives	51
4. Le climat et l’agriculture en Afrique de l’Ouest.....	55
4.1 Contexte et objectifs	57
4.1.1 Un lien étroit entre le climat et la productivité.....	57

4.1.2	Une pression accrue dans le futur.....	58
4.1.3	Mes quatre axes de recherche	59
4.2	Transcrire les liens entre le climat et l'agriculture	60
4.2.1	La modélisation empirique ou statistique.....	60
4.2.2	La modélisation mécaniste.....	62
4.2.3	Perspectives.....	66
4.3	Le couplage entre sciences du climat et sciences agronomiques	67
4.3.1	Le problème des échelles	67
4.3.2	Sensibilité au forçage et biais des modèles de climat.....	70
4.3.3	Perspectives.....	74
4.4	Le changement climatique et ses conséquences sur l'agriculture	75
4.4.1	Le futur des rendements en Afrique de l'Ouest sous l'effet du changement climatique : que dit la littérature ?	75
4.4.2	Projections futurs du mil en Afrique de l'Ouest	78
4.4.3	Perspectives.....	81
4.5	S'adapter aux fluctuations et au changement du climat	82
4.5.1	Date de démarrage de la mousson et date de semis des cultures	83
4.5.2	Les bénéfices potentiels de l'utilisation de la prévision saisonnière	84
4.5.3	Les assurances agricoles basées sur des indices climatiques.....	87
4.5.4	Perspectives.....	88
5.	Perspectives	91
5.1	Variabilité et changement climatique au sahel.....	93
5.1.1	Le cycle saisonnier de la mousson.....	93
5.1.2	La variabilité intra-saisonnière	94
5.1.3	La prévision et les applications.....	94
5.2	Variabilité, changements climatiques et agriculture au sahel	96
5.2.1	La modélisation agronomique.....	96
5.2.2	La régionalisation et le couplage entre climat et agriculture.....	100
5.2.3	Les impacts du changement climatique	101
5.2.4	Changements environnementaux et résilience des agro-systèmes.....	103
6.	Bibliographie	107
7.	Titres et travaux	121
7.1	Publications dans des revues internationales à comité de lecture	123
7.2	Autres publications.....	125

7.3	Communications lors de conférences et congrès internationaux	126
7.4	Communications nationales et séminaires	130
7.5	Communications diverses	131
7.6	Directions de stages universitaires.....	132
7.7	Co-directions de thèses de 3 ^{ème} cycle.....	133
7.8	Encadrement de contractuels et post-doctorants	134
7.9	Participations à des jurys de thèse de 3 ^{ème} cycle	135
7.10	Participations à des projets nationaux et internationaux.....	135
7.11	Coopération scientifique avec les partenaires africains	136
7.12	Expertise de manuscrits et de projets scientifiques.....	137

1. Le contexte de mes recherches

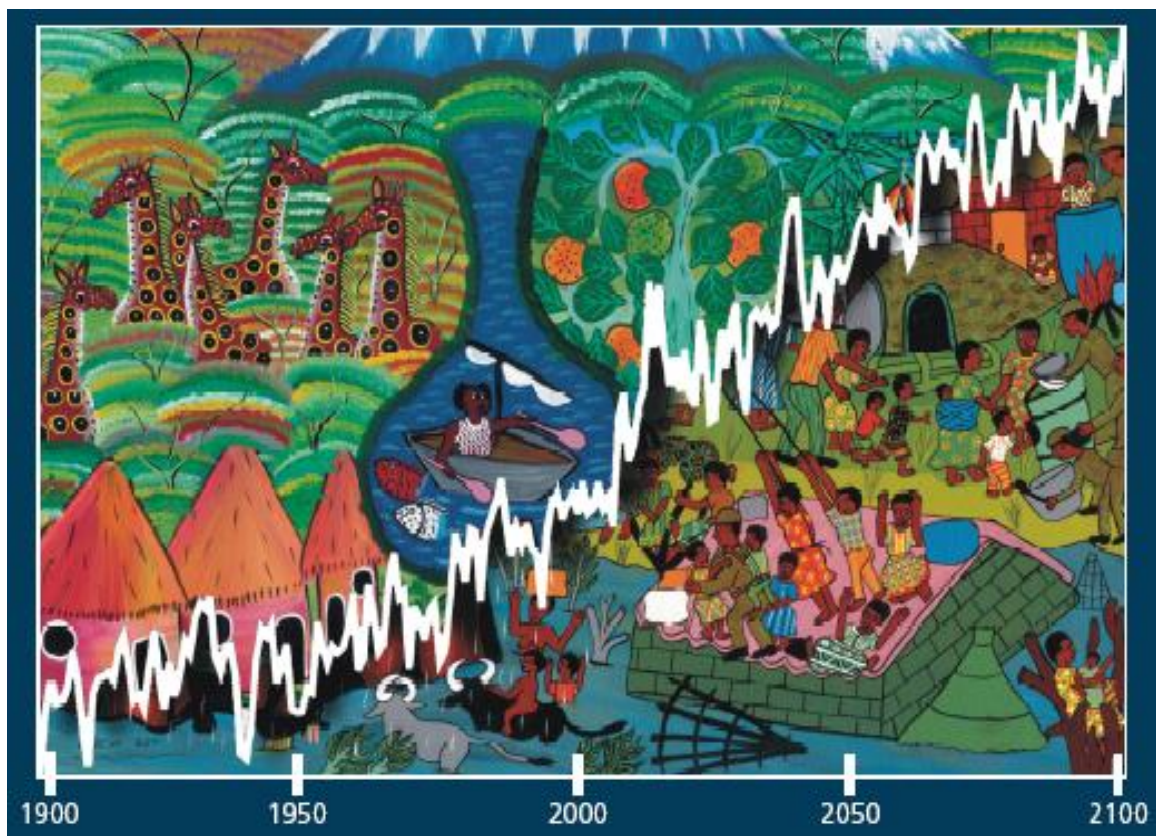


Illustration tirée du livre "Climate change and human health - risks and responses" publié par l'OMS en collaboration avec l'UNEP et OMM (2003).

1.1 Une vulnérabilité face aux variations et au changement climatique

Les populations du Sahel, majoritairement rurales, sont particulièrement concernées par la variabilité climatique dans la mesure où celle-ci conditionne les ressources alimentaires, hydriques et financières avec des retombées directes sur la santé publique. En effet, d'une part, les performances de leurs systèmes de production, élevages ou cultures, sont étroitement tributaires du climat (Bazzaz et Sombroek 1996), et d'autre part le climat influe fortement la dynamique de fléaux meurtriers en Afrique de l'Ouest comme la méningite qui affecte entre 25 000 et 200 000 personnes par an et le paludisme responsable de 90% des décès d'enfants de moins de 5 ans en Afrique. En outre, la pauvreté de ces populations, ne leur permettant pas un accès aux adaptations technologiques (mécanisation, engrais, irrigation) et aux systèmes de soins (vaccination, soins curatifs), constitue souvent un facteur aggravant des impacts socio-économiques du climat. Cette vulnérabilité aux conditions climatiques ne se retrouve pas dans les pays occidentaux qui ont pu se doter d'infrastructures importantes pour protéger ou atténuer l'impact socio-économique des fluctuations naturelles du climat et des autres ressources naturelles. Mais la plupart de ces infrastructures ont un coût environnemental et financier important ou nécessitent des quantités d'eau et d'énergie difficilement compatibles avec un développement sur le long terme de l'Afrique. Cette vulnérabilité face au climat s'est amplifiée à la fin du 20^e siècle sous l'effet d'une réduction de près de 30% des précipitations au Sahel en quarante ans (Brown and Crawford 2008) alors que la population y a doublé. Au cours de cette période, se sont multipliés les exemples frappants de cette vulnérabilité comme les sécheresses des années soixante-dix qui ont provoqué une famine dramatique et où celles des années quatre-vingt ont décimé les troupeaux (PNUD, 2004). Au Darfour, ces sécheresses ont envenimé les relations entre pasteurs et agricultures autour de l'accès aux ressources naturelles de plus en plus rares et ont contribué à provoquer un conflit meurtrier auquel nous assistons impuissants depuis 2003 (Severino et Ray 2010).

A ces fluctuations climatiques récentes s'ajoutent les conséquences attendues du changement climatique. Le 4^{ème} rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), publié en 2007, a en effet alerté la communauté internationale d'une augmentation de la température partout dans le monde ainsi que d'une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité des aléas météorologiques majeurs comme les sécheresses, citant l'Afrique comme le continent le plus vulnérable aux changements climatiques. Ce rapport précise que prévoit ainsi que « *la poursuite des émissions de GES au rythme actuel ou à un rythme plus élevé devrait accentuer le réchauffement et modifier profondément le système climatique au 21^e siècle* ». Même s'il existe encore de nombreuses incertitudes sur les conséquences du réchauffement global sur le climat africain, un tel bouleversement climatique aura assurément des répercussions sur les ressources hydriques et sur la production agricole (CGIAR 2010). Ces impacts attendus représentent une contrainte supplémentaire sur un système de production en équilibre déjà précaire avec la variabilité climatique actuelle et surtout face au défi majeur pour le secteur agricole que représente la croissance démographique en Afrique Sub-Saharienne qui verra sa population doubler en 2050.

1.2 Une mobilisation pluridisciplinaire nécessaire

C'est dans le contexte de cette forte vulnérabilité face au climat qu'il est apparu essentiel à la communauté scientifique de décrire et de comprendre les modes de variabilité du climat en Afrique de l'Ouest pour améliorer la prévision et fournir une aide à la décision aux utilisateurs, qu'il s'agisse d'orienter la stratégie agricole ou bien de planifier des campagnes ciblées de vaccination. Les applications et études d'impacts (ressources en eau, agronomie, santé publique, socio-économie) dont l'enjeu est de répondre au besoin sociétal de développer des stratégies qui réduisent les impacts socio-économiques de la variabilité et du changement climatiques ont ainsi été l'une des motivations du programme de recherche AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine ; Redelsperger et al. 2006) qui a débuté en 2002. Ce programme s'appuie sur une forte coordination internationale de différentes activités incluant des recherches fondamentales et des campagnes de mesures sur plusieurs années (notamment une campagne intensive en 2006) ainsi qu'une réelle impulsion multidisciplinaire de la recherche pour répondre à trois objectifs : (i) améliorer la compréhension de la mousson africaine, (ii) relier la variabilité climatique aux problèmes de santé, de ressources en eau et de sécurité alimentaire et (iii) s'assurer que les résultats des recherches multidisciplinaires soient effectivement intégrés dans les activités de prévision et de décision. Le projet AMMA, à travers la mobilisation multidisciplinaire qu'il suscite (réunissant notamment climatologues, hydrologues, agronomes, biologistes, médecins autour d'objectifs communs) est un cadre idéal pour amorcer un réel dialogue entre les communautés des scientifiques et des utilisateurs pour répondre aux besoins prioritaires des populations.

Si ses enjeux prennent une résonance toute particulière en Afrique Sub-Saharienne compte-tenu de la vulnérabilité des populations face au climat, l'impulsion multidisciplinaire de la recherche autour du climat et de ses conséquences n'est pas le seul fait d'AMMA et de la problématique africaine mais correspond à une inflexion de la recherche du début du siècle probablement liée à la perspective du changement global et de ses conséquences. Parce qu'évaluer les conséquences des fluctuations et du changement du climat sur l'environnement et la société nécessite une approche multidisciplinaire intégrant les experts du climat et de l'évaluation des impacts physiques et humains, on a assisté ces dix dernières années à une place de plus en plus prépondérante de l'interdisciplinarité dans les enjeux sur le changement global portés par le programme ICSU (Earth System Science Partnership de l'International Council for Science). A l'image de AMMA-IP (2005-2010) et de ENSEMBLES (2004-2009), les projets de recherche européens autour du climat intègrent de plus en plus souvent dans leurs objectifs non seulement l'amélioration de la prévision de la variabilité climatique et le réalisme des projections climatiques mais aussi leur traduction en termes de risques ou d'opportunités pour les domaines de la santé, l'agriculture et les ressources en eau. Autre exemple de cette inflexion, à l'échelle nationale cette fois, le programme « *Vulnérabilité, Milieux et Climats* » de l'ANR (Agence National de la Recherche) initié en 2006 s'est progressivement transformé en « *Vulnérabilité, Milieux, Climats et Sociétés* » en 2008 pour devenir « *Changements Environnementaux Planétaires et Sociétaux* » en 2010. En Ile-de-France, le GIS (Groupement d'Intérêt Scientifique) Climat-Environnement-Société a été créé en mars 2007 avec l'objectif de développer et renforcer des recherches pluri et interdisciplinaires permettant de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans l'évolution du climat et les conséquences de cette évolution sur l'environnement et la société.

1.3 Les objectifs de mon travail de recherche

Comme je le montrerai dans ce manuscrit ma contribution dans ce cadre scientifique a été de mettre en œuvre cette recherche multidisciplinaire pour apporter un élément de réponse aux enjeux sociétaux en Afrique Sub-Saharienne. Elle s'inscrit pleinement dans le cadre du programme AMMA dont j'ai largement bénéficié de la dynamique qu'il a suscité (qu'il suscite) notamment à travers des collaborations et des interactions fortes avec les experts nationaux et internationaux et en particulier africains sur la mousson africaine et ses impacts. Mon effort de recherche s'est principalement attaché à répondre aux trois objectifs suivant :

Identifier et étudier les variables climatiques les plus pertinentes en termes d'impacts ou d'applications

Durant les vingt dernières années, en réponse aux grandes sécheresses de la fin des années 60, un effort important a été mené pour transposer les résultats scientifiques sur la compréhension du système de mousson en termes de méthodes de prévision de la qualité de la saison de mousson des semaines avant son démarrage effectif. Certaines de ces méthodes sont même maintenant utilisées dans un contexte opérationnel en Afrique Sub-Saharienne dans le cadre des forums PRESAO (Prévision Saisonnière en Afrique de l'Ouest ; Hamattan et al. 2004) et GHACOF (Great Horn of Africa Climate Outlook Forum). Ces forums réunissent les experts du climat et de la météorologie appartenant aux services météorologiques et hydrologiques nationaux pour réaliser une prévision de la saison à venir chaque année depuis 1998 (Ward et al. 2004). Or un des défauts majeurs de ce système est qu'il ne répond pas aux attentes des utilisateurs quant aux variables climatiques pertinentes pour l'aide à la décision. Des études récentes (Ingram et al. 2002) sur les besoins des agriculteurs au Sahel en termes d'information et de prévision climatique ont permis de mettre en évidence que les variables les plus pertinentes pour la stratégie agricole sont le démarrage et la fin de la saison des pluies ainsi que la distribution des pluies à l'intérieur de la saison de mousson (distribution intra-saisonnière). En effet, le choix de la date de semis est un élément crucial dans la stratégie de l'agriculteur qui doit s'assurer que semis ne soit pas suivi d'une trop longue séquence sèche et que la plante arrive à maturation à la fin de la saison des pluies. De plus l'occurrence de séquences sèches pendant les phases critiques de développement de la plante peut avoir des répercussions importantes sur le rendement et ce même si le cumul saisonnier (total pluviométrique accumulé sur la saison de mousson) est important. Cependant, les forums de prévisions saisonnières ne mettent l'accent que sur le cumul saisonnier qui ne correspond pas à une attente prioritaire pour les agriculteurs. Mes travaux ont donc tenté de combler ce hiatus en documentant le démarrage de la mousson et la variabilité intra-saisonnière des pluies en Afrique soudano-sahélienne, très peu connus avant les années 2000. La démarche, les résultats et les perspectives de ces travaux sont présentés dans le chapitre 2. Les applications de ces études en termes d'aide à la décision pour la stratégie agricole seront abordées dans le chapitre 4.

Traduire les fluctuations et les changements climatiques en termes d'impacts sociétaux

L'information climatique seule n'est pas suffisante pour quantifier les conséquences des fluctuations ou des changements du climat sur la santé publique ou sur les ressources hydriques et agricoles. Il est nécessaire de traduire cette information en termes de risques pour un secteur ou une population donnée. Cette transcription de l'information climatique (températures et/ou précipitations par exemple) en termes de variables agronomiques (rendements agricoles, biomasse) ou en termes d'incidence d'une pathologie dans le domaine de la santé nécessite une interaction forte avec d'autres disciplines (agronomes, biologistes,

hydrologues) pour formaliser les liens entre le climat et les applications au sein d'un modèle d'impacts. Ce type de modèle est particulièrement utile pour synthétiser les connaissances existantes sur les relations avec le climat, explorer des hypothèses comme des changements de climat ou de pratiques, identifier des variables clés où la recherche doit mettre l'accent, et prévoir le futur. On distingue deux approches différentes sur lesquelles je reviendrais largement dans les chapitres 3 et 4 : la modélisation empirique ou statistique et la modélisation mécaniste. Il existe un intérêt évident mais aussi des difficultés inhérentes au couplage de ces modèles d'impacts aux modèles de climat capables de réaliser des projections sur le climat futur aux échelles saisonnière et séculaire. A travers l'exemple de la méningite développé dans le chapitre 3 mais surtout les applications agronomiques décrites dans le chapitre 4 qui constituent le cœur de mon activité de recherche, j'illustrerai la méthodologie, les avancées et les perspectives que j'ai mises en avant dans le cadre de l'étude des impacts du climat sur la santé et l'agriculture.

Evaluer le potentiel de l'information climatique pour l'aide à la décision et la réduction des risques naturels

Etre en mesure d'anticiper les fluctuations climatiques quelques jours à quelques mois à l'avance et/ou de disposer d'informations quantitatives sur les scénarios d'évolution future du climat peut faire une vraie différence dans les stratégies d'adaptation des populations africaines au changement climatique et constituer un premier pas pour réduire la pauvreté. Prenons l'exemple de l'agriculture pluviale: l'agriculteur sahélien a développé une grande diversité de pratiques pour s'adapter à la forte variabilité climatique qu'il observe. Compte-tenu des retombées potentiellement dramatiques d'une péjoration des pluies (famines, migrations), la plupart des pratiques de cet agriculteur sont souvent entachées d'une très forte aversion au risque. Si elles sont le plus souvent très efficaces et lui permettent de produire de quoi survivre en cas de sécheresse prolongée, elles limitent sévèrement le développement de son activité et le maintien dans la pauvreté. Pendant les bonnes années ou mêmes pendant les années normales en termes de pluviométrie, sa production reste basse car il ne prend aucun risque (apports d'intrants, densification de semis, variété améliorée). De plus les changements socio-économiques (population qui augmente, compétition sur les ressources qui se raréfient) et la menace d'une variabilité climatique accrue en réponse au réchauffement global peuvent remettre totalement cette stratégie en question. L'information et la prévision climatique est en mesure d'accompagner une nécessaire augmentation de la productivité pour orienter les choix tactiques (à court terme comme le choix de la variété, date de semis) et/ou stratégiques (à plus long terme comme le choix du système de culture). A une échelle plus grande, elles peuvent également se révéler être un facteur essentiel pour réduire les impacts d'une sécheresse annoncée en facilitant la mobilisation de l'aide nécessaire ; le temps étant souvent l'élément essentiel dans la gestion des crises alimentaires. Cet enjeu est attesté par la part croissante de l'information climatique dans les stratégies de lutte pour réduire les risques naturels et s'adapter aux conséquences du réchauffement global, notamment à travers des systèmes d'alertes précoces (Génézio et al. 2011), dans le secteur de l'agriculture mais aussi dans le domaine des ressources en eau et de la santé publique. Cependant rares sont les études qui mettent en évidence les bénéfices apportées par cette information climatique en Afrique de l'Ouest alors qu'elles sont cruciales pour isoler les variables climatiques les plus pertinentes sur lesquelles la communauté des climatologues devraient se focaliser et pour permettre l'adoption de la prévision dans le processus de décision. C'est sur cette démonstration de l'intérêt de l'information climatique que porte mon activité de recherche. Je l'illustrerai notamment par l'exemple la méningite au Sahel dans le chapitre 3 mais surtout par l'exemple de l'agriculture pluviale dans le chapitre 4.

1.4 Plan du manuscrit

Aux objectifs de mon activité de recherche définis ci-dessus correspondront quatre grandes parties de ce manuscrit :

- **Chapitre 2 : le cycle saisonnier et la variabilité intra-saisonnière de la mousson.** Je présenterai dans ce chapitre, très centré sur les aspects climatiques, les grandes caractéristiques de la mousson africaine et la synthèse de travaux récents autour du démarrage de la mousson et des fluctuations intra-saisonnières.
- **Chapitre 3 : les impacts du climat sur la méningite au Sahel.** Je ferai une brève incursion dans le domaine de la santé publique où seront illustrés dans ce chapitre les liens entre le climat et la dynamique de la méningite cérébro-spinale, une maladie climato-dépendante qui sévit en hiver dans les pays sahéliens.
- **Chapitre 4 : le climat et l'agriculture en Afrique de l'Ouest.** Dans ce chapitre qui représente le gros de ce manuscrit et le cœur de mes activités, je montrerai comment on quantifie le lien entre le climat et l'agriculture pour construire des modèles qui serviront ensuite pour établir des scénarios futurs de rendement sous la contrainte climatique et/ou pour quantifier le bénéfice de stratégies d'adaptation pour l'agriculteur sahélien.
- **Chapitre 5 : Perspectives de recherche.** Ce chapitre fera état de mes perspectives de recherche qui dorénavant particulièrement axés sur la problématique du changement climatique et de l'agriculture au Sahel.

Les parties qui suivent détailleront mes activités en termes de publications, d'encadrement d'étudiants et de contractuels et mes coopérations avec le Sud.

2. La mousson en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnière et intra-saisonnière



Un système précipitant au Sahel. L. Fleury / AMMA. Ouagadougou 2009.

Les pluies de mousson en Afrique de l'Ouest sont un élément essentiel pour les populations africaines puisqu'elles constituent souvent l'unique apport d'eau pour le secteur agricole de ces régions. Les grandes sécheresses des années soixante-dix qui ont provoqué une famine dramatique et où celles des années quatre-vingt ont décimé la quasi-totalité des troupeaux (PNUD 2004) restent encore dans tous les esprits comme un exemple frappant du rôle crucial que joue le climat dans la région sub-saharienne. C'est dans ce contexte d'impacts socio-économiques forts qu'il est apparu essentiel à la communauté scientifique de décrire et de comprendre les modes de variabilités intrinsèques à la mousson africaine à travers nombre d'études diagnostiques et numériques et des expériences de terrain de grande envergure comme GATE en 1974 (GARP Atlantic Tropical Experiment), WAMEX en 1979 (West African Monsoon EXperiment) puis quelques vingt années plus tard AMMA en 2002 (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine). Jusque dans les années 2000, l'effort majeur de recherche autour de la mousson africaine a porté essentiellement sur deux échelles distinctes :

- A l'échelle décennale et interannuelle, il a été montré que la variabilité des pluies de mousson au Sahel est caractérisée par une forte cohérence spatiale, à travers la position et l'intensité de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) avec un rôle important joué par les anomalies de températures de surface de la mer sur l'Atlantique et le Pacifique et les conditions de surface continentale comme l'albédo, l'humidité des sols et la végétation (Folland et al. 1986 ; Ward 1998 ; Janicot et al. 2001).
- L'échelle synoptique et la méso-échelle sont dominées par un caractère intermittent dans l'espace et dans le temps créé par des perturbations d'origine dynamique, les ondes d'Est (Duvel 1990 ; Diedhiou et al. 1998), et par les systèmes convectifs de méso-échelle (Mathon et Laurent 2001) qui modulent la pluviométrie aux échelles de temps inférieures à 10 jours.

Cependant entre ces deux échelles de temps, la variabilité pluviométrique est restée mal connue malgré un impact majeur sur la stratégie agricole au Sahel (je reviendrai sur cet impact dans le chapitre 4). C'est entre ces deux échelles que s'est positionné mon effort sur l'étude de la mousson africaine que je décrirai dans le présent chapitre à travers deux axes principaux : la caractérisation de la mise en place de la mousson et la mise en évidence de fluctuations intra-saisonnières de la mousson. Après une brève introduction sur les éléments majeurs de la mousson africaine, je présenterai ces deux aspects à travers le fruit de mon travail, les résultats des études qui ont suivi et les perspectives qui en découlent.

2.1 Les grands traits de la mousson africaine

La répartition de l'énergie au sein du système Terre-Océan-Atmosphère introduit des disparités entre les basses latitudes qui connaissent un bilan excédentaire et les hautes latitudes caractérisées à l'opposé par un bilan déficitaire. En moyenne annuelle, cette répartition différentielle se résume par une source chaude située dans les régions intertropicales et deux sources froides, l'une entre l'équateur et 10°N à l'altitude correspondant au niveau de pression 300 hPa (approximativement 10 km d'altitude) et l'autre dans les moyennes et hautes latitudes à 800 hPa, à environ 2 km d'altitude (Fontaine et Janicot 1993). Ce sont ces différences, par l'amplification du gradient méridien de température aux latitudes moyennes et du gradient vertical dans les tropiques, qui provoquent la mise en mouvement de l'atmosphère pour rééquilibrer la distribution d'énergie dans le système. Dans les régions intertropicales, cette cinématique se traduit par une circulation méridienne de type Hadley assurant le transfert de l'énergie vers les zones déficitaires que sont les niveaux supérieurs de la troposphère et les pôles (Dhonneur 1985).

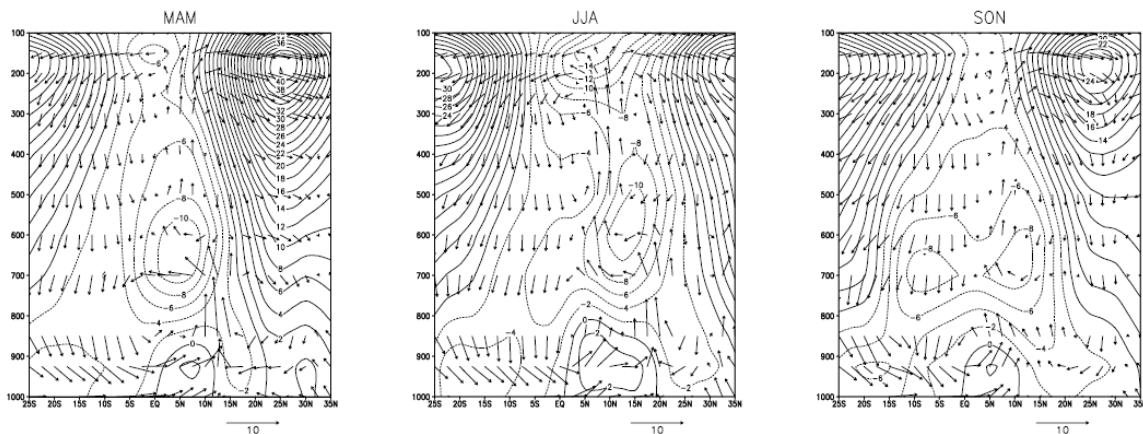


Figure 2.1 : Coupes méridiennes des composantes méridiennes et verticales du vent (vecteurs), ainsi que la composante zonale (contours) des réanalyses NCEP/NCAR en moyenne sur 3 mois pour la période 1980-1990 : de mars à mai (MAM), de juin à août (JJA) et de septembre à novembre (SON). Le vent est moyenné sur la bande de longitude 10°W-10°E d'environ 2000 km centrée autour du méridien origine. Le vent est exprimé en m/s et l'altitude en niveaux de pression (hPa).

La figure 2.1 illustre l'évolution saisonnière de la partie intertropicale de cette circulation méridienne qui décrit un déplacement en direction du pôle d'été et une intensification de la cellule de l'hémisphère d'hiver. Les données atmosphériques sont issues des réanalyses américaines NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996) – que j'ai largement utilisées tout au long de mes activités de recherche – et résultent d'une assimilation entre des observations et des sorties de modèles. On peut observer la convergence entre les cellules d'été et d'hiver qui forme une zone d'intense convection : la ZCIT, ou plus généralement l'Equateur Météorologique. En altitude, cette zone de concentration de la vapeur d'eau advectée par les alizés et les flux de mousson dans les basses couches (Fontaine et Janicot 1993) présente une structure inclinée qui définit deux zones d'ascendance distinctes : la convection sèche et la convection profonde. La trace au sol de la ZCIT que l'on appelle Front Intertropical (FIT) marque la position de la convection sèche moins développée en altitude et plus au Nord que la zone de convection profonde dont l'extension verticale atteint le niveau 200hPa (Fig.2.1). Cette obliquité traduit la forte contribution des conditions de surface au mouvement méridien de la ZCIT qui suit les zones de températures maximales en liaison avec le mouvement apparent du soleil avec quatre à huit semaines de retard (Fontaine et Janicot 1993).

Ce mouvement méridien est mis en évidence par la figure 2.1 où le FIT, défini comme étant la zone de contact en surface entre les vents chauds et secs du Nord-Est et les vents plus frais et humides du Sud-Ouest (Adefolalu 1983) montre une position centrée sur la latitude 12.5°N au printemps de l'hémisphère Nord pour se déplacer vers 17.5°N en été, et reculer à nouveau autour de 10°N en automne. Ce déplacement de la zone de convection sèche qui s'étend jusqu'à 600 hPa s'accompagne d'une translation méridienne de la zone de convection profonde dont la position varie entre la latitude 5°N au printemps et en automne à la latitude 10°N en été boréal. Dans les basses couches, la composante zonale du vent décrit une zone de flux d'Ouest centrée à 5°N en automne qui s'étend en latitude et en altitude au cours de l'été pour concerner les latitudes comprises entre 5°N et 15°N jusqu'au niveau 800 hPa. L'isoligne zéro de la composante zonale du vent délimite l'enveloppe de ces flux de mousson dont la circulation associée est représentée au niveau 925 hPa sur la figure 2.2.

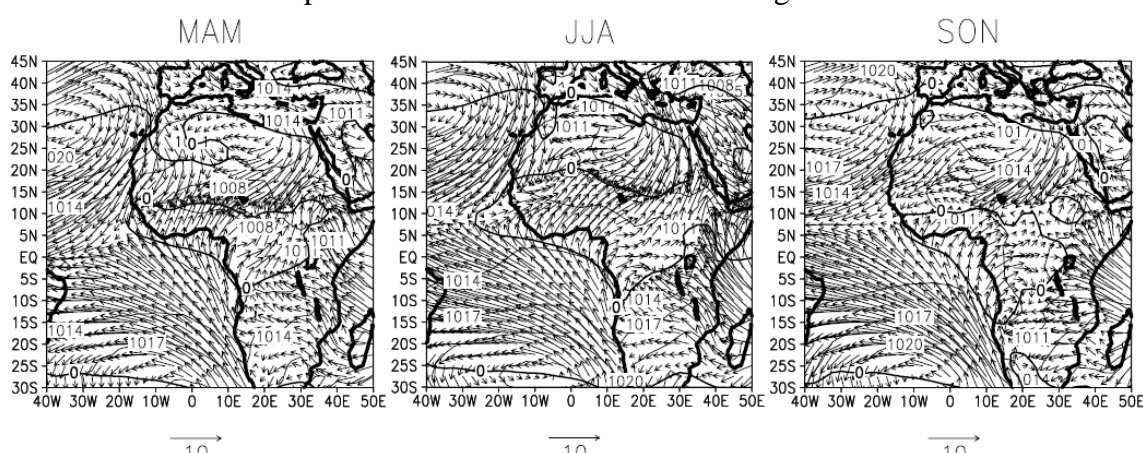


Figure 2.2 : Champs de pression réduite au niveau de la mer (hPa) et de vent à 925 hPa (m/s) des réanalyses NCEP/NCAR en moyenne sur 3 mois pour la période 1980-1990 : de mars à mai (MAM), de juin à août (JJA) et de septembre à novembre (SON). L'isoligne zéro de la composante zonale du vent est marquée en gras.

Le renforcement en été de ce flux zonal est fortement lié à la dynamique des centres d'action atmosphériques. Le forçage radiatif au-dessus du continent africain alimente la dépression thermique de surface qui favorise la pénétration des alizés dont la vitesse augmente avec le renforcement des anticyclones des Açores et de Sainte-Hélène sur l'Atlantique tropical. La mousson prend ainsi une composante de Sud-Ouest contrôlée par l'anticyclone de Sainte-Hélène et d'Ouest en provenance de l'anticyclone des Açores. L'isoligne zéro illustre l'extension de ces vents de mousson, maximale en été, et traduit la position du FIT qui suit les minima de pression au sein de la dépression thermique continentale (Fig.2.2). En altitude (Fig.2.1), la circulation atmosphérique est dominée par des flux d'Est dont les noyaux de vitesse maximale caractérisent la position du Jet d'Est Africain (JEA) et du Jet d'Est Tropical (JET). Le JEA, lié à la source de chaleur de la dépression thermique, est localisé vers 600 hPa par des vitesses maximales autour de 10 m/s entre 10°N et 15°N en été. La dynamique de la convection profonde alimente les flux d'Est à 200 hPa qui définissent le JET dont la position et le déplacement méridien sont très proches de ceux de la ZCIT.

La figure 2.3 présente le cycle annuel moyen des pluies en Afrique. Les données de précipitations CMAP (Xie et Arkin, 1997) sont calculées en combinant des sources de données différentes : mesures in-situ, estimations par satellites, et réanalyses NCEP/NCAR. Le déplacement méridien de la ZCIT apparaît très clairement sur l'Atlantique et l'Afrique. Le long du méridien origine, la zone de maximum de précipitations (supérieure à 1 mm par jour sur la figure) se situe, en hiver boréal au dessus de l'Océan Atlantique et sur le golfe de Guinée. Au printemps, puis en automne, elle se retrouve à moitié sur l'océan et le continent.

Enfin en été boréal, elle est presque totalement au dessus du continent, sur l'Afrique de l'Ouest. Cette répartition des précipitations au cours de l'année implique une distribution des cumuls annuels avec un maximum sur l'Afrique centrale et la Côte guinéenne qui bénéficient d'un double passage de la ZCIT au printemps et en automne, et un gradient Nord-Sud très élevé en Afrique de l'Ouest, conduisant à des précipitations quasi nulles sur le Sahara (Fig.2.3). L'Afrique de l'Ouest, et en particulier la bande sahélienne où l'essentiel des précipitations est concentré sur les mois d'été, est ainsi une région où les fluctuations interannuelles de précipitations peuvent être importantes, même pour des variations faibles dans le cycle saisonnier de la ZCIT.

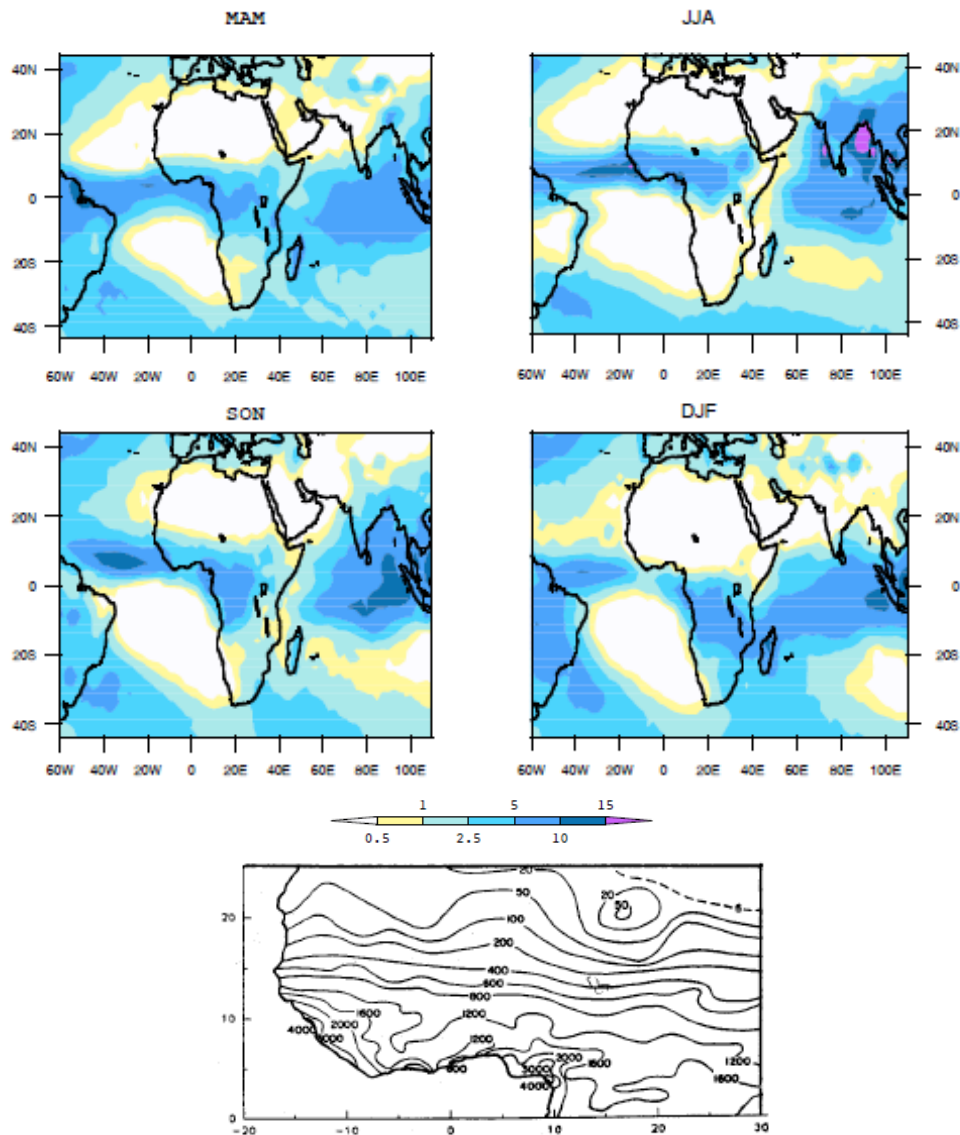


Figure 2.3 : (Haut) Estimation des précipitations moyennes (CMAP ; mm/jour) sur la période 1979-1996 pour les trimestres Mars-Mai (MAM), Juin-Août (JJA) Septembre-Novembre (SON) et Décembre-Février (DJF). (Bas) Cumul annuel moyen des précipitations en Afrique de l'Ouest (mm/an).

2.2 Le cycle saisonnier de la mousson

Le cycle saisonnier moyen au-dessus des régions sahéliennes est caractérisé par une augmentation graduelle des précipitations du printemps à l'été puis une diminution rapide en automne qui marque la fin de la saison humide (Fig.2.4). Le lissage des pluies brutes avec des moyennes mobiles montrent cependant plusieurs ruptures que l'on peut associer au déplacement de la structure inclinée FIT/ZCIT à travers deux étapes dans l'arrivée du système de mousson au Sahel :

- Au printemps, le FIT atteint d'abord le Sahel, accompagné d'une instabilité locale et de phénomènes pluvieux intermittents, pour marquer les premières pluies de la saison. C'est la vision traditionnelle du démarrage de la saison humide qui s'observe par une première rupture de pente au sein du cycle saisonnier.
- Plus tard, vers la fin du mois de Juin, on observe une deuxième rupture de pente par rapport à l'évolution saisonnière. Elle correspond à l'arrivée de la ZCIT à sa position la plus au Nord s'accompagnant des nuages à plus fort développement vertical responsables des pluies intenses. Elle marque le cœur de la saison des pluies et ce que l'on peut appeler la mise en place de la mousson.

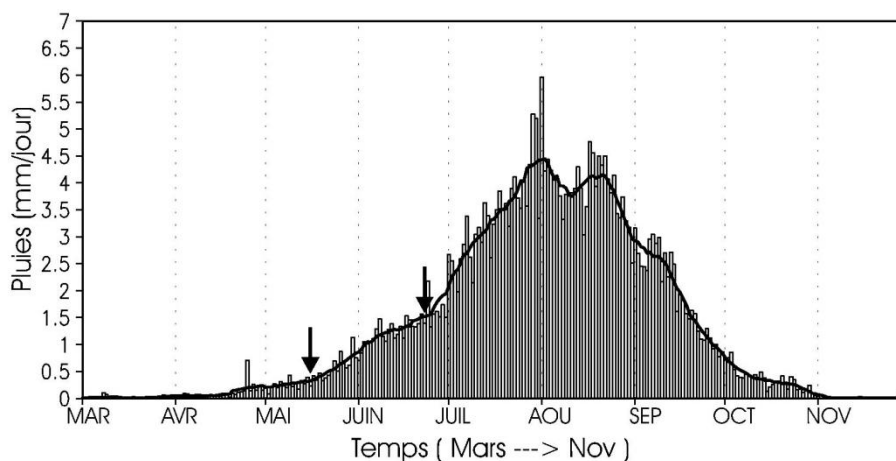


Figure 2.4 : Moyenne des précipitations (mm/jour) entre 10°W-10°E à la latitude 15°N sur la période 1968-1990 (barres). La courbe noire est un filtrage des précipitations où les fluctuations inférieures à 10 jours ont été éliminées. Les flèches marquent les ruptures de pente. Tiré de Sultan et Janicot (2004).

Dans ce qui suit je m'attacherai à décrire ces deux étapes de l'arrivée du système de mousson en mettant l'accent sur la description et les mécanismes de la mise en place de la mousson qui constituent la partie vraiment novatrice du travail que j'ai mené et qui a débouché sur un grand nombre d'études par la suite.

2.2.1 La mise en place de la mousson

Compte-tenu du fort gradient méridien des précipitations, un diagramme latitude-temps permet de résumer efficacement le déplacement des pluies de mousson. Un exemple de ce type de diagramme est représenté sur la figure 2.5 pour l'année 1978 pour laquelle on calcule la moyenne des pluies journalières de chaque point de grille entre 10°W et 10°E. On s'attache ainsi à intégrer régionalement le signal pluviométrique en éliminant les fluctuations locales qui masquent le signal à plus grande échelle. De plus, le bruit induit par la variabilité haute-fréquence journalière est atténué par un algorithme de lissage basé sur des moyennes mobiles

à 11 jours. Ce diagramme montre une transition rapide de la ZCIT entre une première position d'équilibre à 5°N en mai et en juin, marquant la première saison des pluies en Afrique guinéenne, et une deuxième latitude d'équilibre à 10°N en juillet et en août au moment du cœur de la saison humide en Afrique soudano-sahélienne. Le « saut » de la ZCIT entre ces deux positions d'équilibre marque l'installation du régime de mousson aux latitudes soudano-sahéliennes et peut donc être considéré comme la mise en place de la mousson. La date de ce « saut » de mousson peut être repérée au moyen des séries temporelles aux deux latitudes d'équilibre (Fig.2.5) au moment où l'on observe simultanément une forte baisse de la pluviométrie à 5°N et une augmentation rapide des indices pluviométriques à 10°N et à 15°N. Il s'agit du 17 juin pour l'année 1978.

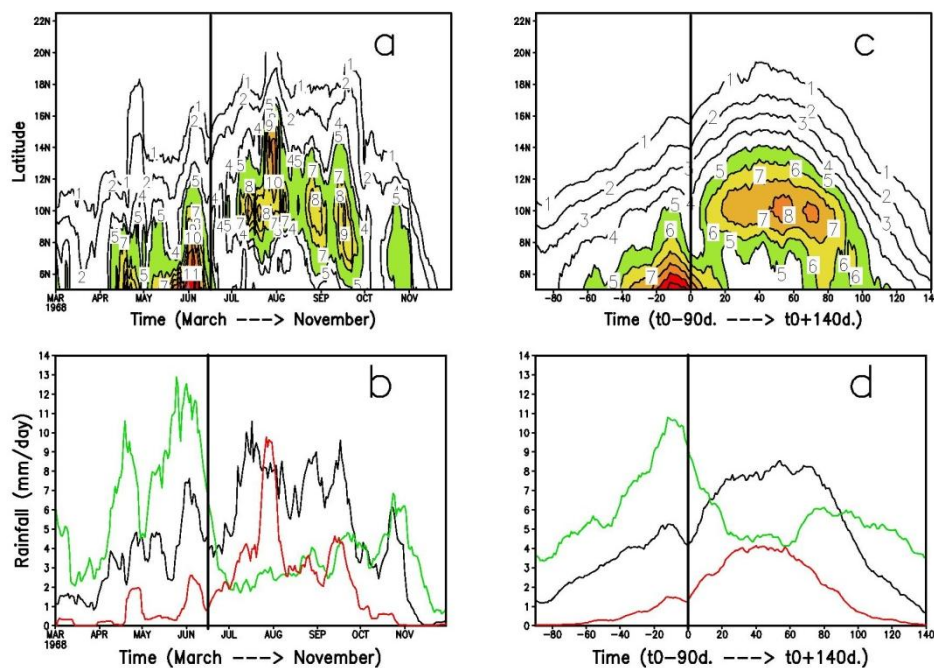


Figure 2.5 : (a) Diagramme latitude-temps de la pluie journalière (mm/jour) entre le 1er mars et le 30 novembre, en moyenne entre 10°W et 10°E. (b) Séries temporelles de la pluie à 5°N (vert), 10°N (noir) et 15°N (rouge) sur la même bande de longitude. (c) idem (a) mais pour la moyenne composite entre 1968 et 1990 autour de la date du "saut" de la ZCIT (t_0). (d) idem (b) mais pour la moyenne composite entre les 90 jours qui précèdent et les 140 jours qui suivent la date du "saut" de la ZCIT (t_0). Pour les 4 figures, la date du "saut" de la ZCIT est marquée par un trait vertical, et les pluies sont lissées à partir de moyennes mobiles sur 11 jours. Tiré de Sultan et Janicot (2000).

Cette méthode a été utilisée pour déterminer les dates de « saut » de la ZCIT pour chaque année de la période 1968-1990. Sur ces 23 années, la date moyenne est le 24 juin avec un écart-type de 8 jours. La moyenne composite des précipitations entre 1968 et 1990 pour un point de grille donné peut être obtenue après un repositionnement des séries temporelles de chaque année dans un repère temporel dont l'origine, t_0 , est la date de « saut » de la ZCIT. Ainsi, le signal du « saut » dans la progression vers le Nord de la ZCIT peut apparaître plus clairement sur les champs pluviométriques moyens. La figure 2.4 représente sur un diagramme latitude-temps les variations du champ composite de précipitations, moyenné entre 10°W et 10°E pour les 90 jours qui précèdent et les 140 jours qui suivent la date moyenne de mise en place de la mousson. Elle met en évidence le déplacement rapide du noyau de forte pluviométrie de la latitude 5°N à la latitude 10°N, marquant ainsi le cœur de la saison des pluies au Sahel et contrastant avec le retrait beaucoup plus progressif de la ZCIT qui commence environ 60 jours après la date de référence t_0 . Cette chronologie de la

migration saisonnière de la ZCIT peut être observée au moyen des séries temporelles des indices de précipitations à 5°N, 10°N et 15°N (Fig.2.5) moyennées entre 10°W et 10°E. Le maximum pluviométrique à 5°N, également visible aux latitudes 10°N et 15°N, apparaît autour de 10 à 20 jours avant la date t_0 . Ce maximum est suivi d'une baisse des précipitations, faible mais généralisée sur toute l'Afrique de l'Ouest, jusqu'à un minimum relatif au moment du déplacement de la ZCIT. A cette date t_0 , le déplacement de la ZCIT est traduit par une augmentation rapide des indices pluviométriques à 10°N et à 15°N. La ZCIT atteint sa nouvelle position d'équilibre, à la latitude 10°N, environ 10 jours après la date de référence t_0 (Fig.2.5).

Cette méthode de détection de la mise en place de la mousson a été la première à être publiée dans la littérature. Plusieurs autres méthodes ont ensuite été développées par la suite. Hagos et Cook (2007) et Fontaine et Louvet (2006) ont utilisé des indices qui correspondent à la différence de cumul moyen pluviométrique entre la région guinéenne et la région sahélienne. Fontaine et al. (2008) ont ensuite utilisé des données d'OLR (Outgoing Longwave Radiation) pour caractériser la convection profonde. Enfin, Gazeaux et al. (2010) ont utilisé des techniques statistiques pour détecter la date de l'arrivée de la convection profonde sur le Sahel et du déplacement vers le Nord du FIT. Ces méthodes ont toutes abouti à une date moyenne de mise en place de la mousson proche de celle que j'ai définie : 28 Juin (Fontaine et Louvet 2006), 30 Juin (Fontaine et al. 2008) et 1^{er} Juillet (Gazeaux et al. 2010).

2.2.2 Le démarrage de la saison des pluies

La notion de mise en place de la mousson est à distinguer de la vision classique du démarrage de la saison des pluies. Cette dernière est en effet basée principalement l'arrivée du FIT (Adefolalu 1983) aux latitudes sahéliennes à laquelle est associée une forte convection locale, marquant ainsi les premières pluies sur le Sahel, à la différence de la mise en place de la mousson qui caractérise l'installation de la mousson et le cœur de la saison humide. Ces différences peuvent être illustrées à travers une analyse composite basée sur la date de démarrage de la saison des pluies telle qu'elle a été définie par les travaux d'Omosho (1992), d'Afelolalu (1983) et d'Adefolalu et al. (1985).

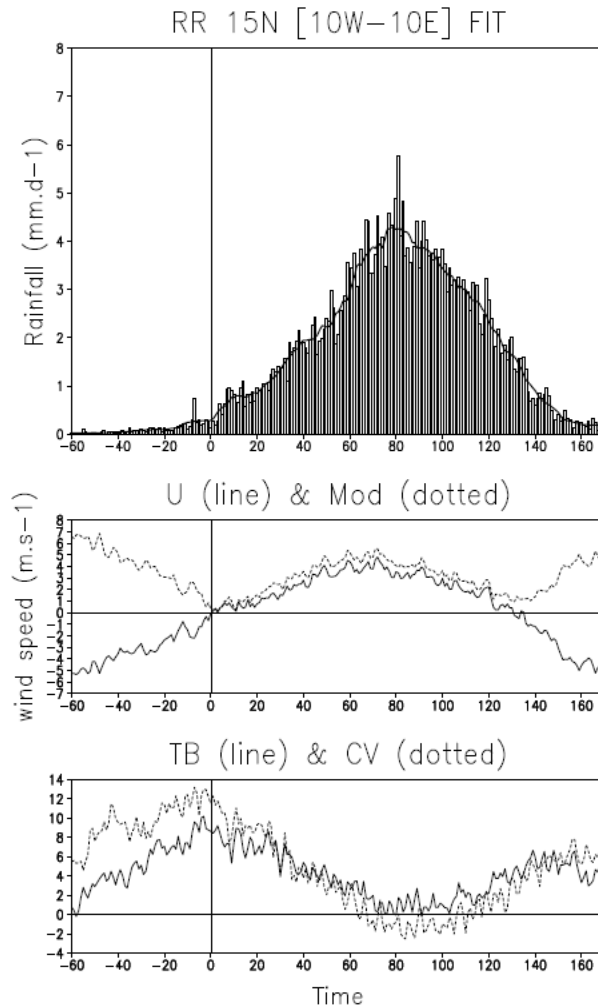


Figure 2.6 : (Haut) Moyenne composite des pluies à 15°N centrées sur la date de démarrage de la saison humide (t_0) pour la période 1968-1990. Les données pluviométriques (mm/jour) sont représentées entre t_0-60 jours et t_0+170 jours en brut (barres) et lissées (trait gras) par des moyennes mobiles glissantes de 11 jours. (Milieu) Moyenne composite de la composante zonale (m/s) et du module (m/s) du vent (trait discontinu) à 925 hPa à la latitude 15°N. (Bas) Moyenne composite du tourbillon (10^{-6} s^{-1}) et de la convergence du vent (trait discontinu en 10^{-6} s^{-1}) à 925 hPa à la latitude 15°N. La date moyenne de démarrage de la saison humide est marquée par un trait vertical sur les trois figures. Tiré de Sultan et Janicot (2004).

Pour déterminer une date de démarrage de la saison des pluies, on a considéré comme marqueur de la position du FIT à la latitude 15°N quatre indices atmosphériques tous basés sur la latitude 15°N et intégrés en moyenne zonale entre 10°W et 10°E :

- L'annulation du vent zonal qui marque la limite entre les vents secs en provenance du Nord et les vents humides en provenance du Sud
- Un maximum de convergence traduisant cette même discontinuité intertropicale (Adefolalu 1983)
- Un maximum de tourbillon relatif marquant l'augmentation de la circulation cyclonique liée à la dépression thermique continentale
- Une augmentation de la vitesse du vent à 15°N traduite par le module du vent

Les séquences composites de ces indices autour de cette date sont représentées sur la figure 2.6. La même moyenne composite appliquée aux pluies de l'IRD à 15°N montrent une rupture de pente claire au moment du passage du FIT avec des pluies qui passent de presque 0 mm à

t0-20 jours à près d'un millimètre 10 à 15 jours après la date de démarrage de la saison humide, que l'on a appelée t0. En cohérence avec les travaux d'Adefolalu (1983), cette séquence composite illustre l'association entre l'arrivée du FIT à 15°N et les premières pluies des latitudes sahéliennes. Sur la période 1968-1990, la date moyenne de démarrage de la saison humide est le 14 mai avec un écart-type de 10 jours. Elle se situe donc environ un mois avant la date que l'on a définie comme la mise en place de la mousson.

2.2.3 Les mécanismes associés à la mise en place de la mousson

A partir d'analyses composites basées sur la date du « saut » de la ZCIT appliquées à des paramètres dynamiques et thermodynamiques des réanalyses NCEP/NCAR, la circulation atmosphérique associée à la mise en place de la mousson a été décrite à travers ses composantes méridiennes et zonales (Sultan et Janicot 2003). Elle laisse supposer un rôle important de la dynamique des basses pressions thermiques sahariennes dans le déplacement de la ZCIT avec deux effets qui semblent contradictoires. D'une part, le renforcement de la circulation méridienne associée au FIT pendant les 10 jours qui précèdent le « saut » de la ZCIT peut inhiber la convection profonde par une intensification de la subsidence dans les couches moyennes initiée par une circulation transverse. D'autre part, la circulation zonale, caractérisée dans les basses couches par une anomalie cyclonique se propageant d'Est en Ouest semble favoriser l'advection d'humidité par des flux de Sud-Ouest sur le Sahel et s'associer avec l'accélération du JEA pour créer des conditions d'instabilité favorables au développement de la convection profonde. C'est la combinaison de ces deux aspects qui peut être à l'origine de la baisse généralisée des précipitations au moment du « saut » de la ZCIT et de la propagation brutale vers le Nord de la ZCIT. L'anomalie cyclonique dans les basses couches traduit un renforcement de la dépression thermique saharienne qui pourrait être induite par l'orographie (Sultan et Janicot 2003). Une approche utilisant un modèle linéaire décrivant la réponse de l'atmosphère à l'orographie a permis de conforter cette hypothèse en mettant en évidence le rôle du relief dans cette amplification de la dépression thermique saharienne (Drobinski et al. 2005). D'autres études, postérieures à mes travaux, ont permis de conforter les mécanismes que j'ai proposés (Ramel et al. 2006 ; Sijikumar et al. 2006 ; Lavaysse et al. 2009) mais également de proposer d'autres hypothèses pouvant expliquer ce « saut » brutal de la ZCIT. Ramel et al. (2006) ont montré avec un modèle régional un lien fort entre la localisation de la dépression thermique saharienne et celle de la ZCIT. Les auteurs ont montré que le déplacement brutal de la ZCIT pouvait être lié à un déplacement rapide vers le Nord de la dépression thermique saharienne, lié aux fortes températures du sol, qui attire par conséquent le flux de mousson vers le Sahel. Hagos et Cook (2007) ont montré à partir d'expériences idéalisées basées sur un modèle régional l'importance du gradient de pression entre le continent et la mer qui provoque une instabilité inertielle favorisant l'advection d'humidité vers le Nord et le développement de la convection sur le Sahel. Enfin, plusieurs études récentes ont mis que le « saut » de la ZCIT pouvait être lié pas seulement aux processus physiques locaux mais aux interactions avec d'autres régions tropicales (Janicot et al. 2009) et/ou méditerranéennes (Chauvin et al. 2010). Les résultats récents de la thèse de E. Flaounas qui a examiné l'ensemble de ces mécanismes à travers le modèle régional WRF a permis de montrer l'importance de la dynamique de grande échelle et notamment la mise en place de la mousson indienne dans le déplacement brutale de la ZCIT (Flaounas 2010). Cependant ils soulignent également l'importance du climat régional dans la mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest (Flaounas 2010). Ces travaux récents sur les mécanismes à l'origine de la mise en place de la mousson ont permis des progrès significatifs sur la prévisibilité du « saut » de mousson. Fontaine et Louvet (2006) et Fontaine et al. (2008) ont en particulier réussi à prévoir de manière assez précise quelques semaines à l'avance la date

de mise en place de la mousson en construisant des modèles statistiques intégrant des prédicteurs de la circulation atmosphérique grande-échelle. Brandt et al. (2010) ont aussi trouvé des corrélations significatives entre la date de mise en place de la mousson et l'extension de la zone de la langue d'eau froide qui se produit 20 jours avant.

2.2.4 Cycle diurne et mise en place de la mousson

Très peu d'études ont documenté le cycle diurne des éléments majeurs de la mousson africaine comme le flux de mousson et la dépression thermique saharienne (Parker et al. 2005 ; Peyrille et Lafore 2007). A partir d'une analyse en composantes principales étendues appliquées séparément sur les réanalyses NCEP/DOE et ERA40 (Sultan et al. 2007), les résultats ont montré que le cycle saisonnier de la mousson africaine peut être décomposé en 2 modes de variabilité distincts. Le premier caractérise l'installation progressive de la circulation de Hadley sur le continent africain jusqu'à un optimum en été boréal. Le deuxième mode caractérise une amplification de la dynamique des basses pressions sahariennes pendant les mois de mai et de juin qui se termine brutalement par le déplacement de la convection profonde de la latitude 5°N à la latitude 10°N marquant ainsi la mise en place de la mousson en Afrique soudano-sahélienne. Le cycle diurne est caractérisé quant à lui par la présence d'un jet d'Ouest nocturne qui s'intensifie après la mise en place de la mousson. Cette étude a également pu mettre en évidence des interactions entre la zone de convection profonde et la zone de convection sèche avec des anomalies se propageant de l'une vers l'autre avec un décalage de 12 heures (Sultan et al. 2007).

2.2.5 Orientation de la SOP en 2006

Dans le cadre du programme AMMA et des campagnes de mesures associées, mes travaux ont non seulement permis de mettre en évidence des événements météorologiques d'intérêt mais également d'orienter la campagne de mesure intensive de l'année 2006 (SOP).

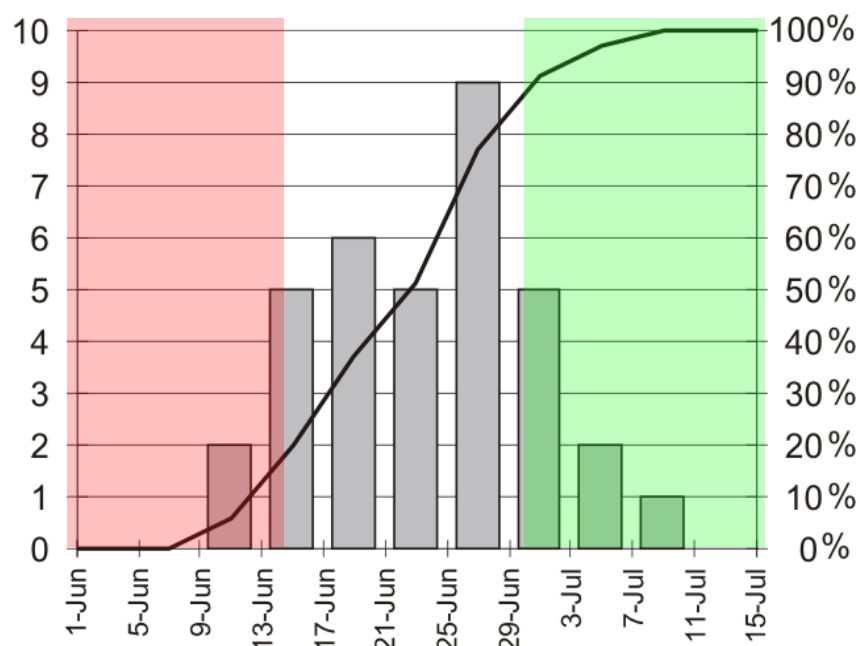


Figure 2.7 : Histogramme des dates de mise en place de la mousson sur la période 1968-2005. La période de deux semaines de la SOP1a (rouge) et SOP1b (vert) est représentée sur le graphique. Adapté de Sultan et Janicot (2003).

Il a pu être montré dans le cadre de mes travaux antérieurs que les mois de juin à juillet représentent une période cruciale pour la mousson africaine avec un renforcement de la circulation atmosphérique associée à la dépression thermique saharienne et un déplacement rapide de la ZCIT qui marque la mise en place de la mousson en Afrique soudano-sahélienne. La campagne de mesure intensive AMMA qui s'est déroulée en 2006 avait pour l'un de ses objectifs de documenter au mieux cette période de transition qui a été appelée SOP1. Pour des raisons de budget, il était impensable que la flotte aérienne déployée pour la campagne reste en Afrique pendant ces deux mois. Il a donc été demandé de choisir deux périodes distinctes avant et après la mise en place de la mousson (appelée respectivement SOP1a et SOP1b). La définition de ces deux périodes s'est appuyée sur les résultats de mes travaux sur la mise en place de la mousson. A partir de la distribution probabiliste des dates de mise en place de la mousson (Fig.2.7), la SOP1a visant à documenter la période avant le démarrage de la mousson a pu être planifiée entre le 1er juin et le 15 juin (avec une probabilité inférieure à 20% d'échantillonner un démarrage précoce de la mousson). De la même manière, la SOP1b visant à décrire la période de mousson déjà installée a été planifiée entre le 1er juillet et le 15 juillet avec une probabilité nulle de manquer d'échantillonner un démarrage tardif de la mousson. Cette stratégie, définie en 2005, a été payante pour la SOP de 2006 puisque malgré un démarrage de la mousson tardif en 2006 (autour du 10 juillet) les SOP1a et SOP1b ont bien pu remplir leur objectif de description des conditions antérieures et postérieures à la mise en place de la mousson.

2.2.6 Perspectives

Dans la suite de mon travail, je me suis davantage focalisé sur les applications agronomiques liées à l'étude de la mise en place de la mousson (voir chapitre 4). Même si la date de la mise en place de la mousson peut être parfois très différente de la date de démarrage des pluies qui détermine le démarrage des cultures au Sahel (Marteau et al. 2011), j'ai montré que tenir compte de cette date de « saut » de mousson pouvait augmenter fortement les rendements moyens et réduire les pertes de récoltes liées à un faux départ de la mousson (Sultan et al. 2005a). Dans le cadre de la thèse de Philippe Roudier, on a montré que les bénéfices de la prévision climatique pour les agriculteurs pouvaient être multipliés par un facteur 3 si on intégrait dans le système actuel la prévision des dates de démarrage et de fin de la mousson (Roudier et al. 2011a). Poursuivre donc les travaux sur la prévisibilité de cette date de démarrage de la mousson relève donc d'un intérêt crucial pour répondre à la demande des utilisateurs. Outre les modèles statistiques déjà développés dans la littérature, il existe plusieurs systèmes de prévision dynamique comme celle du Centre Européen à échéance de 45 jours mais aussi le système TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble TIGGE ; Bougeault et al. 2010) pour lequel les performances à prévoir la date de démarrage de la mousson n'ont encore jamais été évaluées. Compte-tenu de son importance pour l'agriculture (Roudier et al. 2011a), il conviendrait de faire des études similaires de prévisibilité sur la fin de la saison de mousson. Marteau et al. (2008) ont d'ailleurs montré que la prévisibilité de cette fin de la saison de mousson pouvait se révéler bien supérieure à celle de la mise en place de la mousson. Enfin, compte-tenu de la difficulté des modèles de climat globaux à représenter des caractéristiques régionales comme la mise en place de la mousson, il existe très peu de littérature explorant la façon dont le démarrage de la mousson mais aussi la fin de la saison humide peuvent évoluer dans le futur dans le contexte du réchauffement climatique. Pourtant des études récentes (Biasutti and Sobel 2009; Patricola and Cook 2010) ont montré que le seul signal robuste dans l'évolution des pluies au Sahel issu des simulations CMIP3 du GIEC est un décalage dans le cycle saisonnier des pluies avec moins de pluies au

début de la saison de mousson et plus de pluies sur la fin. Je souhaiterais donc explorer cette question de l'évolution du cycle saisonnier dans le futur en me basant sur un ensemble de simulations de modèles régionaux AMMA-ENSEMBLES à 50km de résolutions qui représentent de manière assez réaliste le « saut » de la mousson lorsqu'ils sont forcés par les réanalyses ERA-I. J'évaluerai dans un premier temps le cycle saisonnier de la mousson dans les modèles régionaux forcés avec ERA-I puis avec deux modèles globaux pour essayer par la suite de dégager des tendances pour le futur.

2.3 La variabilité intra-saisonnière

Au moment où j'ai démarré ma thèse de doctorat, l'échelle intra-saisonnière des modulations de la mousson, bien que déterminante pour la stratégie agricole, était très peu présente dans la littérature. La figure 2.8 représente un exemple de cycle saisonnier au Sahel pour une année particulière, l'année 1968. Les pluies brutes sont représentées en blanc, et en rouge figurent les pluies filtrées de manière à mettre en évidence le cycle saisonnier. On peut observer que les ruptures au sein du cycle saisonnier associées au démarrage de la saison humide (15 mai) et à la mise en place de la mousson (27 juin) s'intègrent dans un mode de variabilité intra-saisonnière qui persiste tout au long de la saison humide, suggérant l'importance des fluctuations intra-saisonnières dans la compréhension du cycle saisonnier.

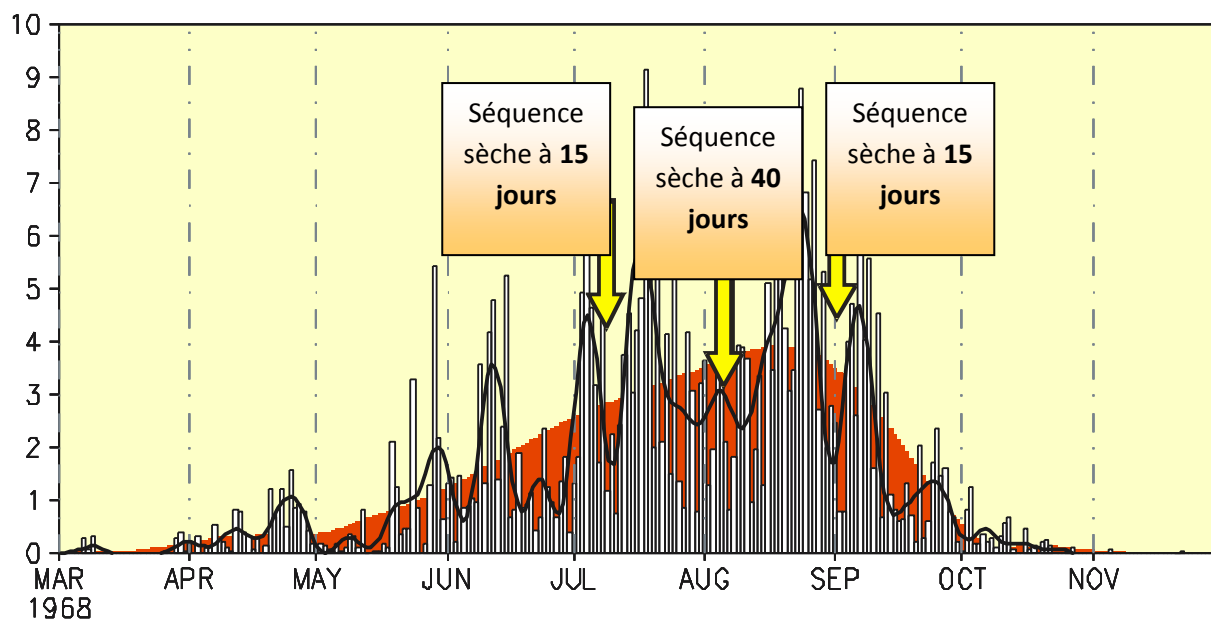


Figure 2.8 : Exemple de cycle saisonnier pour l'année 1968 en moyenne régionale sur le Sahel (12.5N-15N ; 10W-10E). Les pluies (mm/jour) apparaissent brutes en blanc, filtrées entre 10 et 60 jours en noir, et filtrées au-dessus de 60 jours en rouge. Tiré de Sultan et Janicot (2004).

De manière à mettre en évidence le signal intra-saisonnier, les pluies brutes de la figure 2.8 ont été filtrées pour éliminer les fluctuations haute-fréquence inférieures à 10 jours (courbe noire). La série filtrée fait observer deux modes de variabilité : à courte échelle de temps avec des séquences humides et sèches autour de 15 jours et à plus basse fréquence avec plusieurs jours marqués par une baisse de la pluviométrie au milieu du mois d'août. Ces deux modes de variabilité sont récurrents chaque année et des analyses spectrales ont montré qu'ils s'expriment dans deux fenêtres spectrales : entre 10 et 25 jours, et entre 25 et 50 jours (Sultan et al. 2003).

2.3.1 La variabilité intra-saisonnière à 10-25 jours

Pour caractériser le mode dominant, on a réalisé une analyse composite sur une période de plus de 20 ans en utilisant cet indice des précipitations régionales filtrées pour sélectionner des phases sèches et humides qui contribuent à plus de 30% au cycle saisonnier (Janicot et Sultan 2001). Pour une année individuelle, on sélectionne les dates centrales des phases positives que l'on note t_0 , et on moyenne toutes les phases positives entre elles 10 jours avant la date centrale et 10 jours plus tard. Une séquence composite moyenne est obtenue, décrivant l'évolution moyenne de l'indice intra-saisonnier pendant les phases positives de l'année considérée. La même moyenne composite est réalisée pour les phases d'affaiblissement de la mousson. On moyenne alors séparément toutes les phases positives ensemble et toutes les phases négatives ensemble pour obtenir deux séries synthétisant l'évolution moyenne de l'indice intra-saisonnier au cours des phases de renforcement et d'atténuation de la mousson (Fig.2.9).

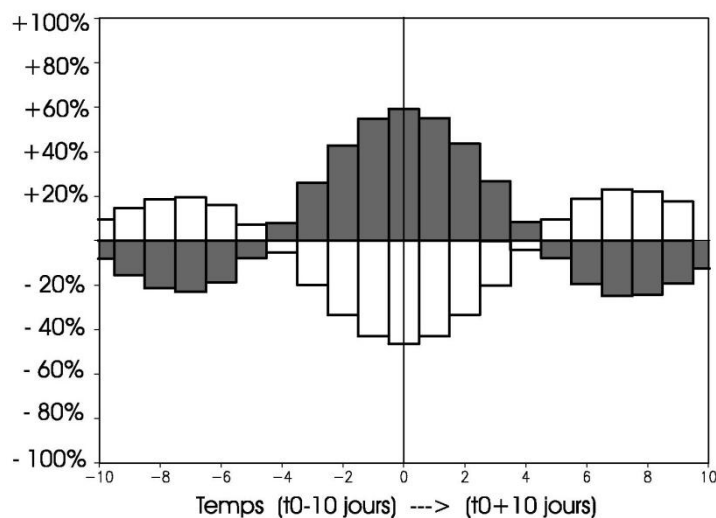


Figure 2.9 : Moyenne composite des séquences humides (gris) et sèches (blanc) de la pluviométrie sur la bande sahélienne 12.5°N-15°N / 10°W-10°E sur la période 1968-1990. Les valeurs représentent l'importance de l'anomalie intra-saisonnière par rapport au cycle saisonnier (en %). Tiré de Janicot et Sultan (2001).

En moyenne sur la période considérée, on observe entre juin et septembre 3.9 séquences humides et 4.5 séquences sèches. La moyenne est assez élevée puisqu'elle atteint une contribution de près 60% au cycle saisonnier au temps t_0 pour les phases de renforcement (en grisé) et montre des valeurs autour de 50% pour les phases d'affaiblissement de la mousson. Les structures composites positives et négatives ont une allure quasi-symétrique et présentent toutes deux des anomalies assez faibles du signe opposé avant et après la date centrale t_0 . Les séquences sèches et humides durent 9 jours et appartiennent à une fluctuation dont la période est assez courte, autour de 15 jours. Ceci atteste la forte dominance de la variabilité entre 10 et 25 jours au sein de l'intra-saisonnier. L'application de cette même analyse composite aux variables atmosphériques issues des réanalyses NCEP/NCAR a permis de relier ces phases de renforcement et d'affaiblissement de la mousson à un signal atmosphérique intra-saisonnier se propageant d'Est en Ouest à une vitesse d'environ 4 degrés par jour et décrivant le passage d'une succession de larges circulations dépressionnaires sur le Sahel (Sultan et al. 2003). Cette analyse a été poursuivie dans le cadre de la thèse de Flore Mounier qui a montré que ces fluctuations à 10-25 jours pouvaient se décomposer en deux modes de variabilité distincts: un dipôle quasi-bihebdomadaire zonal et un mode sahélien (Mounier et Janicot 2004).

Le dipôle quasi-bihebdomadaire zonal

Une analyse en composante principale appliquée sur un indicateur de la convection profonde (Outgoing Longwave Radiation; OLR) filtré entre 10 et 25 jours fait ressortir un mode dominant décrit par Mounier et al. (2008) comme un dipôle quasi-bihebdomadaire zonal. Environ 5.5 événements de ce type, plus ou moins intenses, se font ressentir en moyenne au cours de l'été. La figure 10 montre une séquence type de ce dipôle intra-saisonnier avec une oscillation de la convection qui s'amplifie et décroît sur le Sud et le centre de l'Afrique de l'Ouest. Cette oscillation apparaît en opposition de phase avec une anomalie de convection au large de l'Atlantique entre 60°W et 30°W, mettant en évidence une structure en dipôle avec une périodicité moyenne de 14 jours. Les anomalies d'OLR se propagent d'Ouest vers l'Est entre ces deux pôles (Fig.10). Les mécanismes sous-jacents à ce dipôle ont été examinés par Mounier et al. (2008). Les auteurs ont montré qu'il pouvait être contrôlé par des ondes atmosphériques équatoriales se propageant vers l'Est proches des ondes de Kelvin et des interactions entre le rayonnement et l'atmosphère, où des anomalies de températures de surface engendrées par une augmentation du rayonnement net pendant les phases d'affaiblissement de la convection en Afrique Centrale pourraient générer des anomalies cycloniques et un renforcement de l'advection d'humidité sur le continent africain.

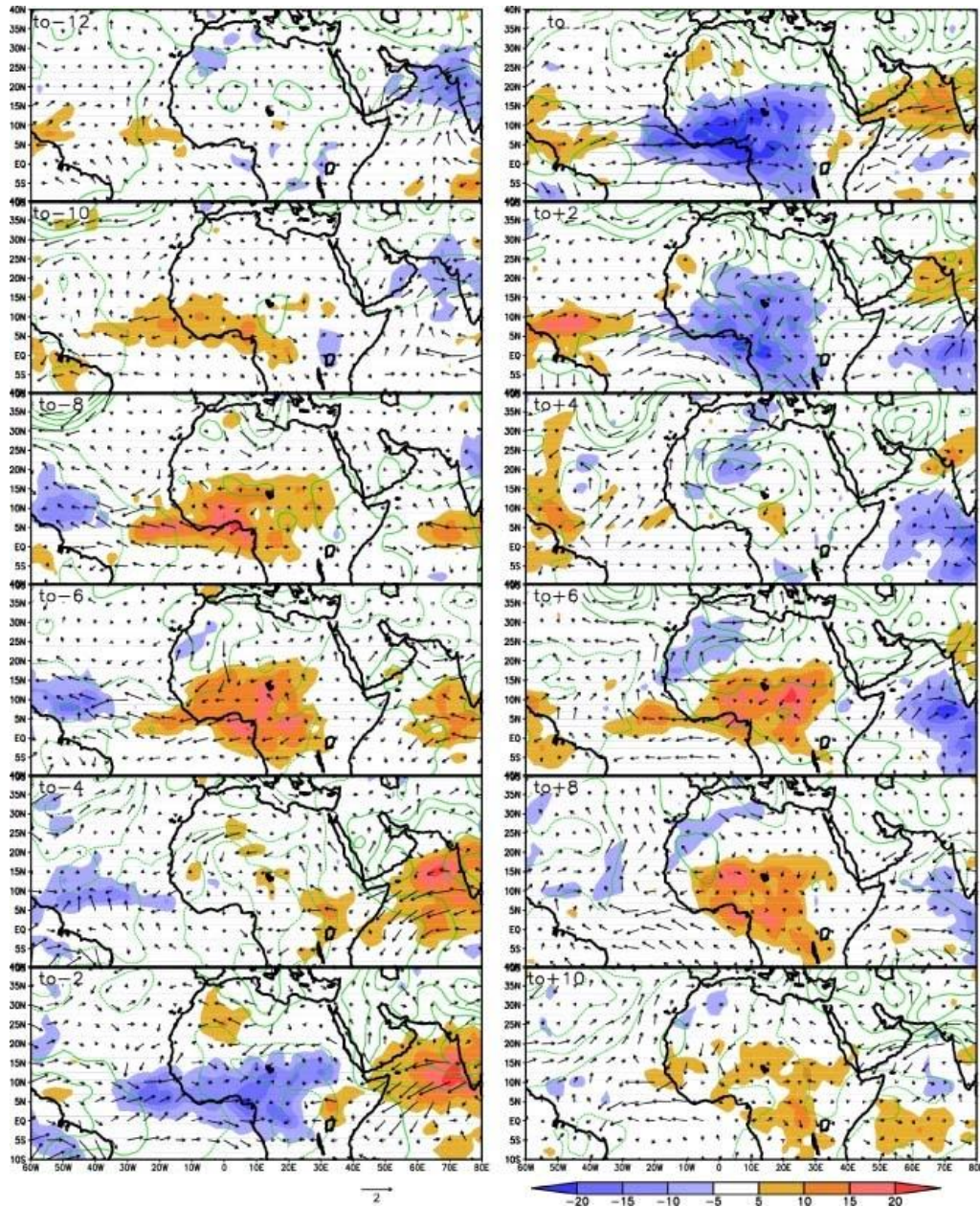


Figure 2.10 : Séquence temporelle d'une anomalie intra-saisonnière typique du mode dipolaire intra-saisonnier. Les anomalies sont reconstruites à partir du 1^{er} mode d'une ACP appliquée à l'OLR filtré entre 10 et 25 jours sur la période 1979-2006. Les anomalies intra-saisonnières de l'OLR sont représentées en couleur et les anomalies de vent à 925 hPa en vecteurs. Tiré de Janicot et al. (2010a)

Le mode sahélien

Le mode sahélien a été mis en évidence pour la première fois au cours de ma thèse (Sultan et al. 2003) puis analysé plus en détail par Janicot et al. (2010b). Il se caractérise par une périodicité proche de celle du mode dipolaire décrit précédemment (15 jours en moyenne) mais à la différence de celui-ci présente une anomalie de convection qui se déplace de l'Est (initée en Afrique de l'Est ; voir la Fig.2.11 à t0-12) vers l'Ouest jusque dans l'Atlantique Tropical (t0+4 sur la Fig.2.11).

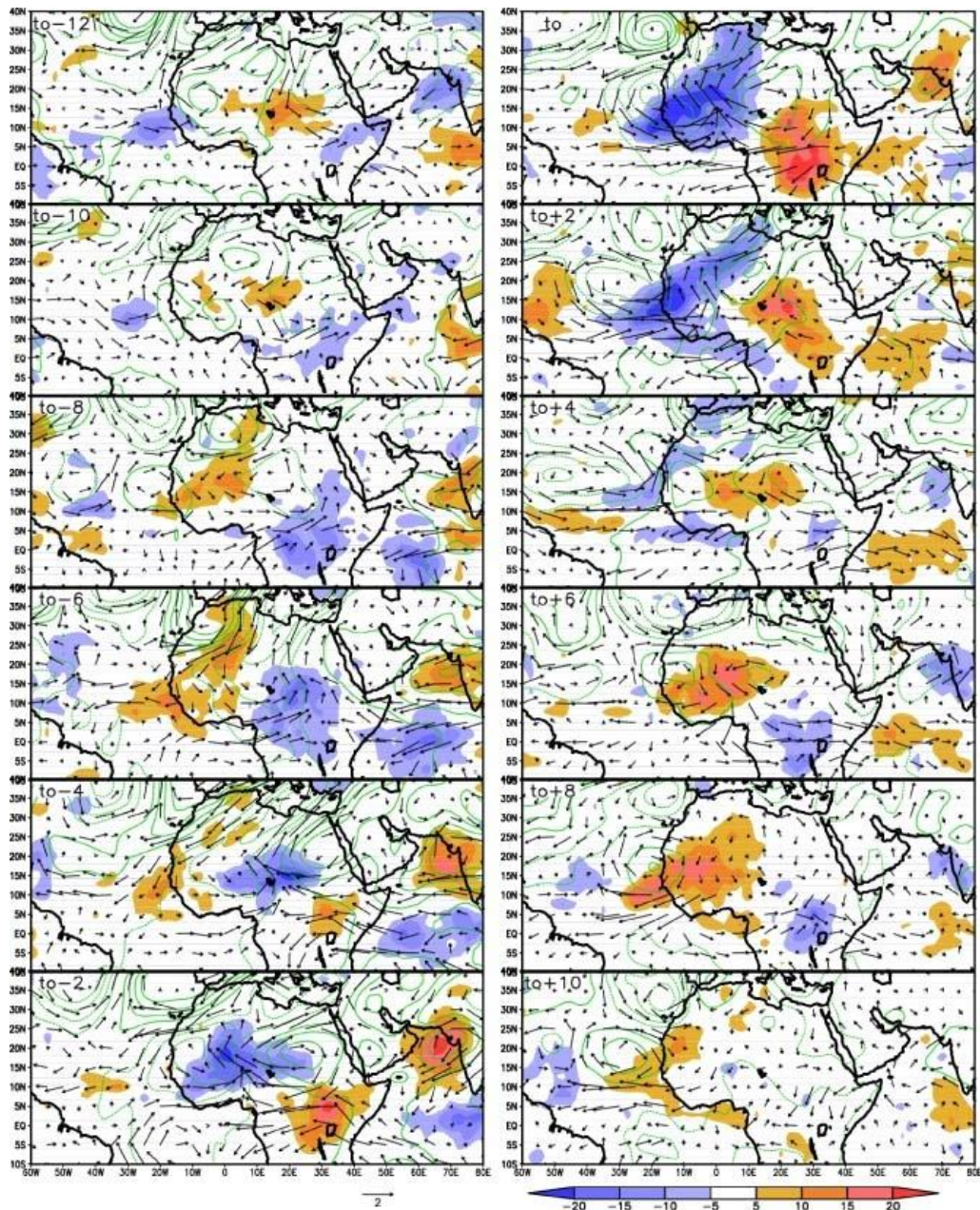


Figure 2.11 : Idem Fig.2.10 mais pour le second mode de l'ACP et pour les vents à 700 hPa. Tiré de Janicot et al. (2010a)

Les anomalies négatives de la convection sont associées à l'avant à une circulation cyclonique de basses couches (visible à 700 hPa sur la Fig.10) qui se déplace vers l'Ouest et qui apporte des conditions favorables au renforcement intra-saisonnier de la convection par l'intermédiaire d'un renforcement des vents chargés en humidité en provenance du Sud et de l'Ouest (Sultan et al. 2003). Des études récentes (Taylor 2008 ; Taylor et al. 2010) ont montré que cette circulation atmosphérique pourrait trouver son origine d'interactions entre la surface et l'atmosphère à travers des variations de flux de chaleur sensible induits par le renforcement intra-saisonnier de la convection. D'autres études (Lavender et al. 2009 ; Janicot et al. 2010b) évoquent une origine différente, purement liée à l'atmosphère à travers des ondes internes équatoriales proches des ondes de Rossby.

2.3.2 La variabilité intra-saisonnière à 25-90 jours

L'observation d'indices pluviométriques et de convection filtrés ainsi que les analyses spectrales ont montré qu'à ce signal entre 10 et 25 jours se superposait une modulation plus faible de la convection à basse-fréquence autour de 40 jours (Sultan et al. 2003 ; Mounier et Janicot 2004). L'examen des indices pluviométriques zonaux bruts montre que ce signal à 40 jours correspond à un minimum de précipitations important au milieu de la saison humide que l'on retrouve pour un grand nombre d'années avec toutefois une amplitude et une position variable à l'intérieur de la saison. Cette baisse de la convection, la mise en place de la mousson et à la fin de la saison humide appartiennent à un signal entre 30 et 40 jours dans les analyses spectrales. Une analyse composite sur les précipitations sahéliennes filtrées entre 25 et 60 jours montre que des minimums d'activité convective à basse fréquence apparaissent quasiment tous les ans (19 années sur les 23 de la période 1968-1990) avec une dispersion assez forte des dates d'occurrences caractérisées par un écart-type de 18 jours et une moyenne au 12 août. La moyenne composite des pluies, centrée sur la date du minimum de la convection entre 25 et 60 jours (t_0) au Sahel (Fig.2.12) met en évidence une forte baisse de la pluviométrie de près de 5 mm pendant 15 jours qui débute à t_0-17 jours, suivie par une remontée pendant plus de 15 jours à partir de t_0 .

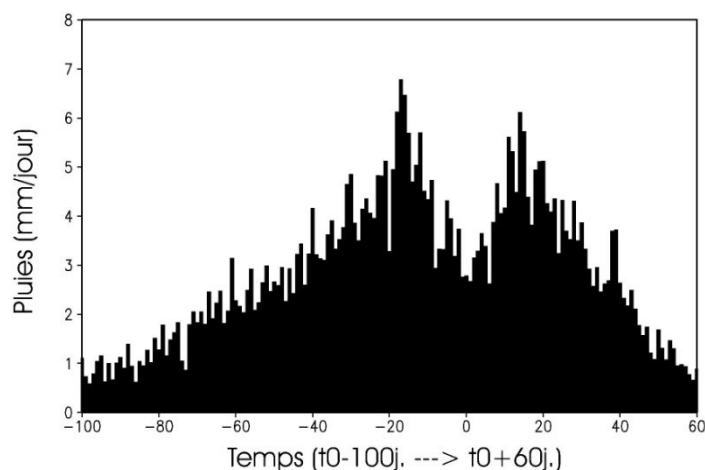


Figure 2.12 : Moyenne composite des 19 phases d'affaiblissement de la mousson (t_0) détectées sur la période 1968-1990. Le signal pluviométrique est moyenné sur la région 12.5°N-15°N et 10°W-10E filtré. Les séries temporelles (mm/jour) sont centrées sur la date t_0 du minimum intra-saisonnier pluviométrique et représentées entre t_0-100 jours et t_0+60 jours. Tiré de Sultan et Janicot (2004).

Matthews (2004) et Janicot et al. (2009) ont associé ce mode intra-saisonnier à l'Oscillation Madden-Julian (MJO). En effet, les anomalies négatives de convection associées au mode à 40 jours sur l'Afrique Centrale coïncident avec un signal proche de celui de la MJO sur l'Inde et l'Ouest du Pacifique. Matthews (2004) suggère que des ondes équatoriales de Kelvin se propageant vers l'Est et de Rossby se propageant vers l'Ouest peuvent lier les anomalies intra-saisonniers en Afrique et en Inde. La rencontre de ces deux ondes équatoriales au dessus de l'Afrique Centrale pourrait être à l'origine d'un renforcement intra-saisonnier de la convection (Matthews 2004). Les anomalies intra-saisonniers de la convection se propageant vers l'Ouest sur l'Afrique suggèrent une importance particulière des ondes équatoriales de Rossby (Janicot et al. 2009 ; Lavender et Matthews 2009). Mieux comprendre et prévoir ces fluctuations à 40 jours est d'un enjeu crucial pour au moins deux raisons. La première est que ces fluctuations peuvent être associées au déclenchement de la mousson Africaine. Janicot et al. (2008) ont en effet montré que ce signal intra-saisonnier à grande-échelle a pu jouer un rôle majeur sur la mise en place de la mousson en 2006 au moment de la campagne intensive

du programme AMMA. La deuxième raison est que l'occurrence d'une séquence prolongée pendant laquelle la mousson est affaiblie et les pluies quasi-inexistantes peut entraîner des pertes importantes pour les récoltes si cette phase sèche apparaît pendant une phase critique pour le développement des cultures. A l'aide d'un modèle de croissance de plante qui prédit le rendement du mil (que je présenterai plus en détail dans le chapitre 4), j'ai en effet montré qu'une séquence intra-saisonnière sèche arrivant au moment de la floraison et du remplissage des grains pouvait réduire de manière très significative le rendement du mil au Niger (Sultan et al. 2005a).

2.3.3 La prévisibilité des fluctuations intra-saisonnières

Contrairement à la mousson indienne, il existe très peu de littérature sur la prévisibilité des fluctuations intra-saisonnières de la mousson africaine, en dépit de l'importance de la distribution des pluies pour l'agriculture notamment. Actuellement l'effort sur la prévisibilité et la prévision opérationnelle des pluies est davantage focalisé en Afrique sur le cumul annuel des pluies comme l'illustre le travail autour du forum PRESAO (Prévision en Afrique de l'Ouest). Dans un article récent (Sultan et al. 2009), j'ai évalué la prévisibilité des fluctuations intra-saisonnières de la convection en Afrique en considérant à la fois les modèles dynamiques et la prévision statistique.

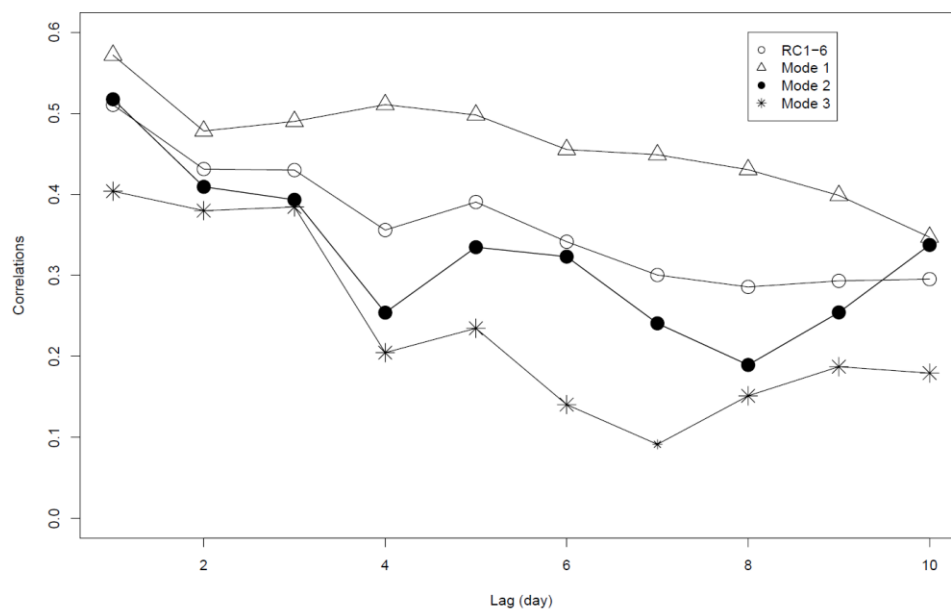


Figure 2.13 : Corrélations entre la prévision du modèle du Centre Européen et les modes intra-saisonniers de variabilité en Afrique en fonction de l'échéance de prévision (en jour). Le mode 1 correspond au mode à 25-90 jours, les modes 2 et 3 respectivement aux bandes de fréquences 10-15 jours et 15-25 jours. Tiré de Sultan et al. (2009).

La figure 2.13 montre la qualité prédictive du modèle du Centre Européen pour différentes gammes de fréquences de la variabilité intra-saisonnière en Afrique de l'Ouest en fonction de l'échéance de prévision. Si les variations inférieures à 25 jours (modes 2 et 3) sont assez mal prévues par le modèle, les fluctuations supérieures à 25 jours (typiquement le mode à 25-90 jours que j'ai décrit précédemment) sont assez bien prévues avec une corrélation supérieure à 0.5 entre la prévision et l'observation pour des échéances de prévision entre 1 et 5 jours. J'ai ensuite comparé ce score de prévision à celui d'un modèle statistique que j'ai élaboré en me basant sur l'analyse en spectre singulier (Singular Spectrum Analysis ; SSA) et sur des modèles auto-régressifs. Les scores de prévision se sont révélés très souvent supérieurs à ceux

issus de la modélisation dynamique. Ces scores sont particulièrement élevés lorsque le signal intra-saisonnier est fort et persistant. Lorsque les caractéristiques des fluctuations intra-saisonniers changent (lorsque la fréquence et/ou l'amplitude changent), la qualité prédictive du modèle chute rapidement. Le même type de comportement est observé pour les modèles statistiques utilisés pour prévoir les phases actives et inactives de la mousson indienne (Cadet et Daniel 1988). Cela suggère la nécessité d'introduire d'autres indicateurs (prédicteurs) dans la construction des modèles statistiques que le signal de convection lui-même.

Pour répondre aux besoins de la campagne intensive de mesures du programme AMMA en 2006, le modèle a ensuite été implémenté en temps réel avec des chaînes de traitement automatisées rapatriant chaque jour les dernières images du satellite de la NOAA et en diffusant le résultat de la prévision sur un site Internet actualisé chaque jour. Pendant la campagne de mesure de l'été 2006, ces prévisions étaient également diffusées sur le site Internet de l'AOC (AMMA Operational Center) à Niamey, Toulouse et Paris qui s'est révélé comme l'un des outils majeurs de la campagne de terrain. La figure 2.14 présente un exemple de produit qui pouvait être diffusé sur le site de l'AOC. Il s'agit du mode de variabilité à 40 jours de la convection en Afrique guinéenne (noir) et de sa prévision à 5 jours (vert) à l'aide du modèle que j'ai développé. La corrélation entre les deux est de 0.61.

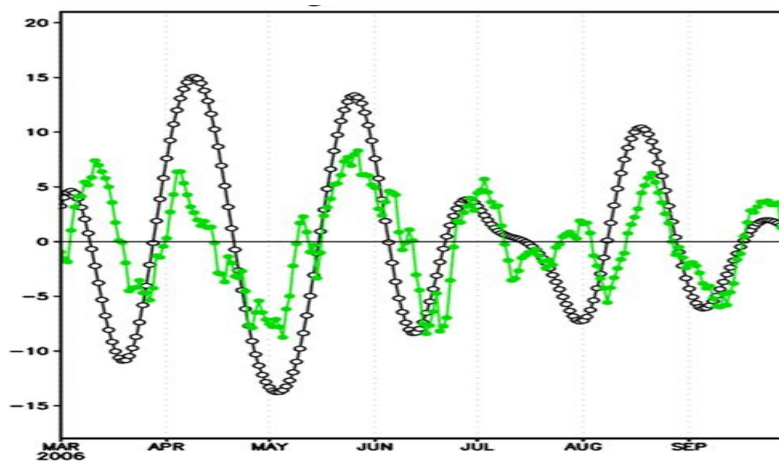


Figure 2.14 : Mode de variabilité à 40 jours de la convection en Afrique guinéenne (noir) qui correspond au 1^{er} mode issu de la SSA appliquée à l'OLR sur l'Afrique guinéenne. Prévision à 5 jours de ce mode (vert) à l'aide du modèle SSA-MEM. La corrélation entre les deux est de $R=0.61$.

Ces analyses et prévisions ont été publiées dans les bulletins hebdomadaires de l'AOC décrivant les événements majeurs de la grande échelle de la mousson estivale de 2006. Ces bulletins ont également été diffusés sur le site Internet de l'AOC. Une synthèse de ces bulletins a déjà été publiée dans la revue CLIVAR Exchanges (Janicot et Sultan 2007).

2.3.4 Perspectives

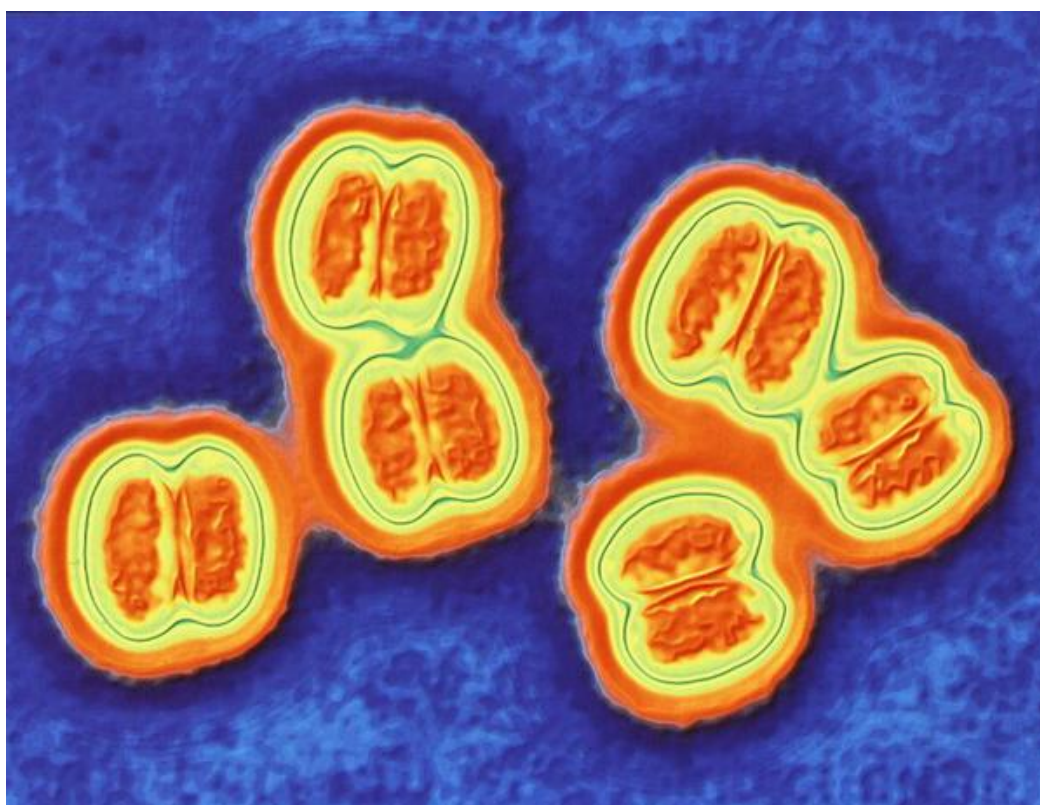
Compte-tenu de l'importance des fluctuations intra-saisonniers de la mousson pour l'agriculture, l'évaluation de la prévisibilité de ces fluctuations et la mise en place de méthodes de prévision des séquences sèches de la mousson sont des pistes cruciales à explorer dans les prochaines années. De nombreuses méthodes ont démontré leur efficacité pour la prévision des phases actives et inactives de la mousson indienne (par exemple Chattopadhyay et al. 2008 ; Xavier et Goswami 2007). Elles sont même déjà été implémentées en opérationnel à l'IITM (Indian Institute of Tropical Meteorology, Pune,

Inde). Je souhaiterais donc évaluer le potentiel de ce type de méthodes en Afrique et comparer leur qualité respective des prévisions dans les deux régions. En particulier, il pourrait être intéressant de faire des analyses composites pour comprendre pourquoi la prévision peut-être meilleure pour une année ou pour une région donnée et faire ainsi ressortir des indicateurs grande-échelle pouvant être utilisés comme indicateurs de confiance sur la prévision des modèles statistiques. D'autre part, en plus des prévisions dynamiques du Centre Européen, il existe maintenant de nouvelles prévisions d'ensembles issues de modèles dynamiques (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble TIGGE ; Bougeault et al. 2010) et aucune évaluation n'a été faite à ma connaissance de ce système de prévision appliqué aux fluctuations intra-saisonnières en Afrique. Améliorer le score de prévision des fluctuations intra-saisonnières en utilisant de nouvelles méthodes statistiques ou l'état de l'art des systèmes de prévision dynamique devrait pouvoir faire évoluer à terme les produits diffusés par les systèmes de prévision opérationnelle comme PRESAO vers des variables comme les séquences sèches au sein de la saison humide plus proches des attentes des utilisateurs. Enfin, à une autre échelle, celle du changement climatique, je souhaiterais évaluer la façon dont les fluctuations intra-saisonnières en Afrique et en Inde (mais aussi leurs interactions telles que les ont observées Janicot et al. 2009) sont représentées dans les nouvelles simulations des modèles du GIEC AR5 et comment elles pourront potentiellement évoluer dans le futur.

Synthèse

Mes travaux ont été les premiers à mettre en évidence deux éléments importants de la mousson africaine : le « saut » de la mousson et l'existence de fluctuations intra-saisonnières. L'analyse du cycle saisonnier de la mousson a montré que le déplacement méridien de la ZCIT vers le Nord s'effectue de manière brutale avec un « saut » à la fin du mois de juin qui caractérise la mise en place de la mousson en Afrique soudano-sahélienne. Les mécanismes à l'origine de ce « saut » sont complexes et multiples, résultant de la dynamique régionale du climat africain et de téléconnexions avec les autres régions tropicales et les régions extra-tropicales (la région méditerranéenne en particulier). L'étude de la variabilité intra-saisonnière de la pluviométrie africaine a mis en évidence que les pluies de mousson tout au long de l'été s'organisent en séquences humides et sèches avec des périodicités variables. Des fluctuations autour de 15 jours semblent être liées à deux modes de variabilité régionale (Afrique et Atlantique Tropical): un dipôle quasi-bihebdomadaire zonal et un mode sahélien. Des fluctuations à plus basses fréquences autour de 40 jours semblent appartenir à un mode tropical plus vaste incluant la mousson indienne associé à une structure proche de celle de la MJO. Une meilleure compréhension et une meilleure prévision de la mise en place de la mousson et des fluctuations intra-saisonnières de la mousson sont des éléments cruciaux pour mieux répondre aux attentes des utilisateurs en termes d'information climatique.

3. Les impacts du climat sur les épidémies de méningites en Afrique de l'Ouest



Neisseria meningitidis, la cause de la méningite à méningocoque -
doi:10.1371/journal.pmed.0020024.g001

Les variations climatiques et environnementales influent fortement la dynamique de fléaux meurtriers en Afrique de l'Ouest comme la méningite qui affecte entre 25 000 et 200 000 personnes par an et le paludisme responsable de 90% des décès d'enfants de moins de 5 ans en Afrique. En outre, la pauvreté de ces populations, ne leur permettant pas un accès aux systèmes de soins (vaccination, soins curatifs), constitue souvent un facteur aggravant dans la survenue des épidémies. Dans ce contexte une meilleure compréhension des risques environnementaux favorisant l'occurrence de maladies comme le paludisme et la méningite constitue un premier pas pour la mise en place de système d'alertes précoces pour lutter efficacement contre ces problèmes de santé publique. Dans ce qui suit je détaillerai le travail que j'ai mené sur la mise en évidence de facteurs environnementaux dans l'occurrence d'épidémies de méningite au Sahel et le potentiel d'utilisation de ce type d'indicateurs environnementaux pour la construction de systèmes d'alertes précoces.

3.1 La méningite et l'environnement

La Méningite Cérébro-Spinale (MCS) affecte l'Afrique sahélienne depuis des siècles, mais alors qu'avant les années 1980, elle touchait cette région de manière irrégulière, depuis le début de cette période elle y est devenue endémique (Greenwood 1999 ; Greenwood 2006). Dans les décennies 1980 et 1990, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a enregistré entre 25 000 et 200 000 cas par an, dont environ 10 % de cas mortels (WHO 2003 ; 2000). La MCS est donc devenue un problème de santé publique particulièrement important dans une région parmi les plus pauvres du monde et déjà affectée par la diminution de la pluviométrie depuis la fin des années 1970. Le méningocoque (*Neisseria meningitidis*) est une bactérie à transmission interhumaine qui s'effectue par les voies aériennes. Comme elle ne survit pas longtemps hors de l'organisme, c'est la proximité immédiate avec un autre organisme qui lui permet de survivre. Pour cette raison, les communautés fermées (écoles, crèches, quartiers à forte densité...) constituent des milieux à haut risque (WHO 2003), tout comme les mouvements de populations (comme les pèlerinages réguliers à la Mecque). Une fois l'épidémie de méningite déclenchée, la vaccination de masse est souvent une réponse privilégiée à l'urgence. Elle couvrira toute la population du district en épidémie à partir de l'âge de 6 mois. Mais, en cas de ressources vaccinales insuffisantes, elle sera restreinte aux sujets âgés de 6 mois à 30 ans (vaccination ciblée) en attendant de pouvoir l'élargir à l'ensemble du district. Une combinaison de conditions favorables (relevant de l'environnement, de l'hôte et du micro-organisme) est probablement nécessaire pour que survienne une épidémie (WHO 2003). La réceptivité immunologique de la population (peut-être due à la perte de l'immunité de groupe vis-à-vis de la souche prévalente), un bas niveau socio-économique, la transmission d'une souche virulente et un contexte climatique particulier (saison sèche, tempête de sable) ont été identifiés comme les conditions les plus importantes. Parmi ces facteurs, l'hiver des régions soudano-sahéliennes caractérisé par une grande sécheresse et des vents forts présente des conditions favorables au développement de la méningite (Greenwood et al. 1984 ; de Chabalier et al. 2000). L'influence du climat sur la maladie est d'ailleurs à l'origine du concept de la « ceinture de méningite » qui a été introduit par Lapeysonie (1963) pour décrire la zone d'incidence privilégiée de la maladie. Elle s'étend entre les isohyètes 300 et 1100 mm/an, soit entre les latitudes 4°N et 16°N (Fig.3.1a et 3.1b). Une revue exhaustive et actualisée de la répartition géographique des épidémies de méningite en Afrique a été réalisée par Molesworth et al. (2002). Elle montre que, bien que sévissant dans des proportions moindres, des épidémies de méningite ont été enregistrées à l'extérieur de la classique ceinture de la méningite, en particulier en Afrique de l'Est et du Sud (Fig. 1a ; Molesworth et al. 2002). Des travaux récents (Cheesebrough et al. 1995 ;

Molesworth et al. 2003) ont quantifié le rôle des facteurs environnementaux et notamment du climat sur l'existence de cette ceinture de méningite. Molesworth et al. (2003) ont élaboré une carte de risque épidémique de la méningite en se basant sur l'humidité absolue, le type de couvert végétal, la concentration de poussière et la taille de la population. Cette carte (Fig.3.1c) s'avère être très proche de la carte de l'incidence observée des épidémies.

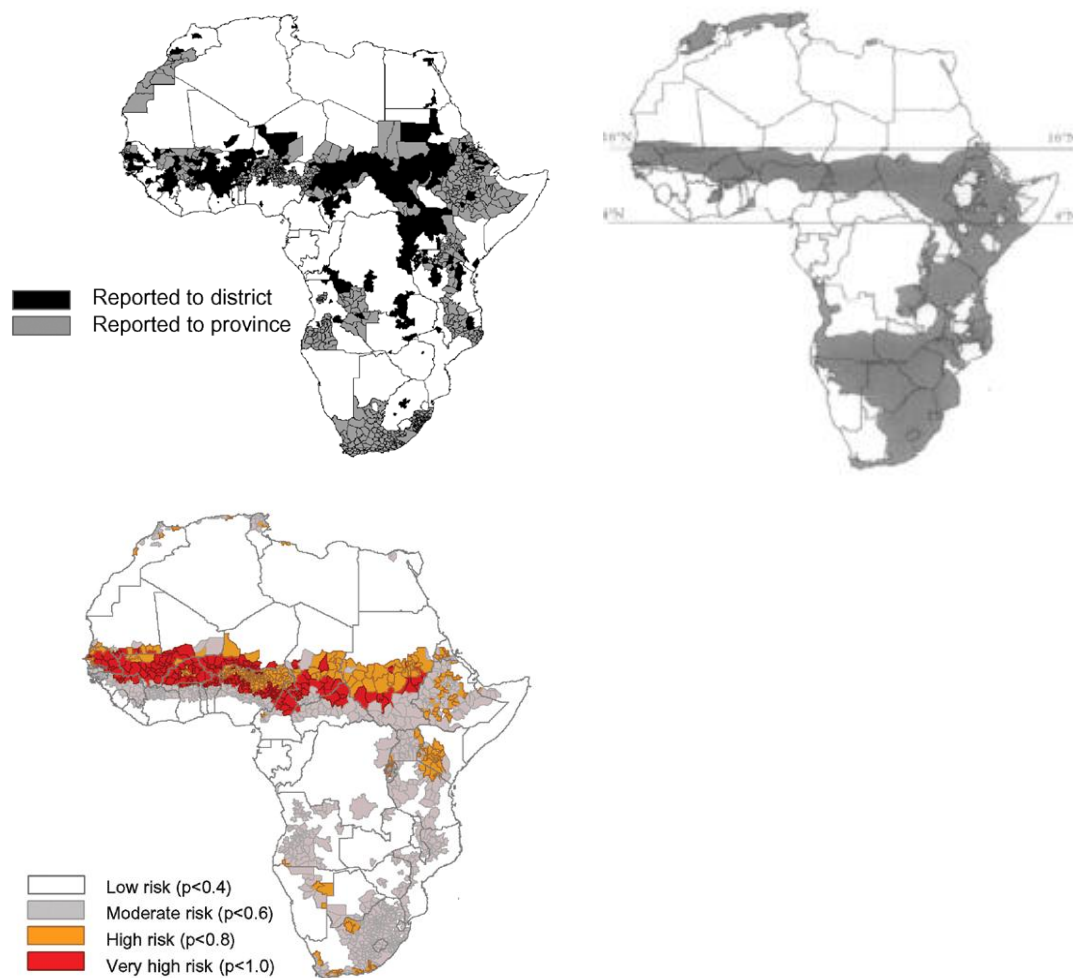


Figure 3.1: (A) Districts touchés par les épidémies de méningite sur la période 1841-1999 (Molesworth et al. 2002). (B) Pluie annuelle sur la période 1920-1980 avec en grisée la zone où les précipitations sont comprises entre 300 et 1100 mm/an (Molesworth et al. 2002). (C) Zones à risque de la méningite selon un modèle statistique basé sur des variables environnementales (Molesworth et al. 2003).

Cependant, si les variables environnementales semblent déterminer la distribution géographique de l'incidence de la maladie, la manière dont le climat exerce son impact sur les épidémies reste inconnue (Greenwood 2006). Les effets de la variabilité climatique sur la dynamique épidémique sont en effet difficiles à mettre en évidence de part un emboîtement de phénomènes d'échelles distinctes, d'interactions avec des facteurs biologiques (immunité, fragilité de l'organisme), démographiques et socio-économiques. Dans ce contexte, les travaux que j'ai menés en collaboration avec des épidémiologistes de l'IRD et des géographes de PRODIG se sont révélés pionniers en mettant en évidence pour la première fois le rôle du climat sur la saisonnalité de la méningite et sur les variations interannuelles de la maladie.

3.2 La dynamique saisonnière de la méningite

Les variations climatiques jouent un rôle important dans la chronologie de l'épidémie, qui démarre en février pour disparaître au mois de mai en Afrique sub-saharienne. En effet, la partie soudano-sahélienne de l'Afrique est soumise à l'alternance d'une saison sèche en hiver, dominée par des vents secs du nord, connus sous le nom d'Harmattan, et une saison humide qui démarre au printemps pour être maximale en été avec la mise en place de la mousson. Le contexte climatique caractéristique de l'hiver des latitudes subtropicales présente des conditions favorables au développement de la méningite : alors que la sécheresse et les vents forts, chargés de poussières, peuvent stimuler l'invasion du méningocoque en lésant directement la barrière muqueuse ou en inhibant les défenses immunitaires de surface, l'humidité du printemps et des latitudes guinéennes réduit considérablement le risque de transmission (Chippaux et al. 2000). Or il existe très peu d'études quantitatives attestant de ce lien entre le climat et la dynamique saisonnière en Afrique. Mon objectif a donc été de proposer une approche pluridisciplinaire pour illustrer et documenter le contexte climatique favorable à la méningite à travers la construction d'indices atmosphériques, et tenter de mettre en évidence une cohérence entre l'échelle régionale de la circulation atmosphérique et l'évolution saisonnière d'une épidémie de méningite au Mali.

J'ai réalisé avec Karima Labadi une analyse statistique croisant des données épidémiologiques nationales sur le Mali et les réanalyses NCEP qui décrivent la circulation atmosphérique à grande échelle. Les données épidémiologiques provenant de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) portent sur le nombre de cas et de décès à l'échelle hebdomadaire recensé de la maladie sur les 11 années de la période 1992-2002 au Mali, seul pays pour lequel nous disposons d'une base de données relativement complète. Ces observations sont agrégées à l'échelle du pays, à l'exception de l'année 2002 pour laquelle on dispose d'une information à l'échelle plus fine des districts. La collecte de ces données a été réalisée par les centres de santé du pays qui les ont transmises à l'OMS et plus précisément au CSR/CDS (Epidemic bacterial diseases Global Alert and Response) de Genève. Ces données épidémiologiques nous ont d'abord permis de fournir une description complète du cycle saisonnier de l'épidémie. La figure 3.2a, tirée de Sultan et al. (2004), met en évidence à partir du calcul de la moyenne des anomalies standardisées du nombre de cas l'évolution saisonnière de l'épidémie avec les 5 premières semaines présentant des anomalies négatives et un démarrage à la 6^{ème} semaine avec une première valeur positive. La longueur de « l'année épidémique » peut être définie par le nombre de semaines consécutives présentant des valeurs positives, c'est-à-dire 4 mois (16 semaines).

De manière à éliminer le bruit lié à un démarrage plus ou moins précoce de l'épidémie et ainsi à améliorer la description de l'évolution saisonnière du nombre de cas au Mali, on réalise une moyenne composite en faisant coïncider pour chaque année de la période 1994-2002 la semaine du démarrage de l'épidémie, que l'on appelle So . On détermine donc pour chaque année de la période 1994-2002 la semaine du démarrage de l'épidémie par une rupture de pente (test de Pettitt) dans l'évolution annuelle du nombre de cas. La date moyenne du démarrage de l'épidémie s'observe entre la 5^{ème} et la 6^{ème} semaine (5.66), entre le 7 et le 15 février, avec un écart-type d'environ 2 semaines (1.94). La figure 3.2b représente cette moyenne composite pour les 3 semaines qui précèdent et les 30 semaines qui suivent le démarrage de l'épidémie. On observe l'augmentation rapide du nombre de cas entre So et $So+6$, une période de plus d'un mois où l'épidémie est la plus active entre $So+6$ et $So+10$ suivie d'une diminution rapide de l'épidémie jusqu'à une disparition 16 semaines après le démarrage. Les phases d'augmentation et de diminution du nombre de cas présentent une

allure symétrique avec un laps de temps d'environ 1 mois et demi pour que l'épidémie atteigne son optimum après son démarrage S_0 , et le même laps de temps pour qu'elle disparaisse après S_0+10 semaines.

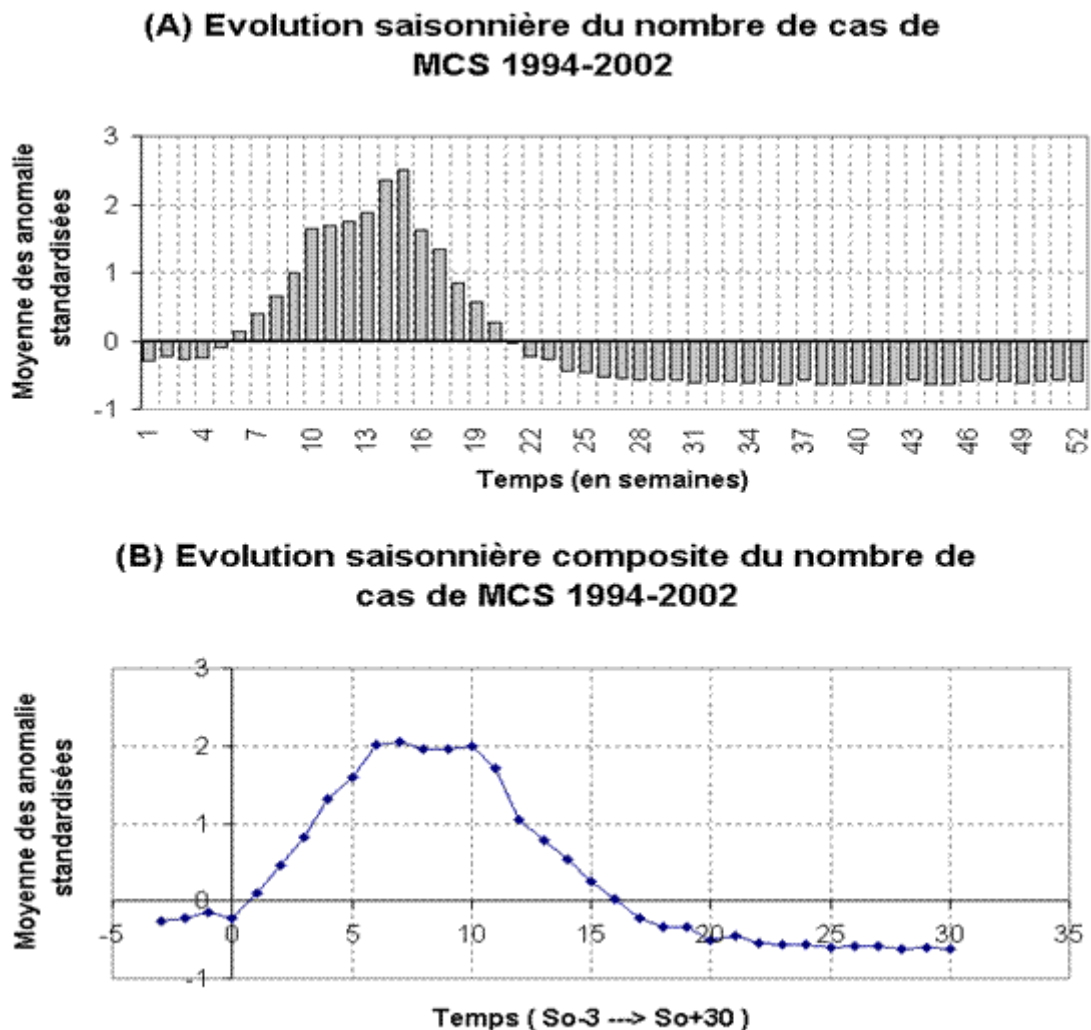


Figure 3.2 : (A) Evolution annuelle du nombre de cas de méningite (MCS) en moyenne sur la période 1994-2002. (B) idem (A) mais en moyenne composite centrée sur la semaine du démarrage de l'épidémie (s_0) pour les 3 semaines qui précèdent et les 30 semaines qui suivent ce démarrage. Tiré de Sultan et al. (2004).

On s'est ensuite intéressé à la circulation atmosphérique qui caractérise les grandes phases de l'évolution saisonnière de la maladie que l'on a mises en évidence (Fig.3.3). Des moyennes composites du vent de basses couches et de l'humidité spécifique en surface ont été réalisées pour les 3 semaines qui précèdent le démarrage de l'épidémie (S_0-3), au moment de ce démarrage (S_0), pour les semaines S_0+6 et S_0+10 qui sont les semaines où l'on recense le maximum de cas de MCS au Mali, et pour les 15 et 20 semaines qui suivent le démarrage de l'épidémie (S_0+15 et S_0+20), c'est-à-dire lors de la disparition de cette épidémie. On observe clairement que la phase de démarrage coïncide avec un renforcement du vent d'Harmattan et une accentuation de la sécheresse sur la zone soudano-sahélienne. Puis on observe un recul progressif de la circulation d'hiver au moment où l'épidémie atteint son pic et une disparition de la maladie qui coïncide avec l'arrivée de la mousson.

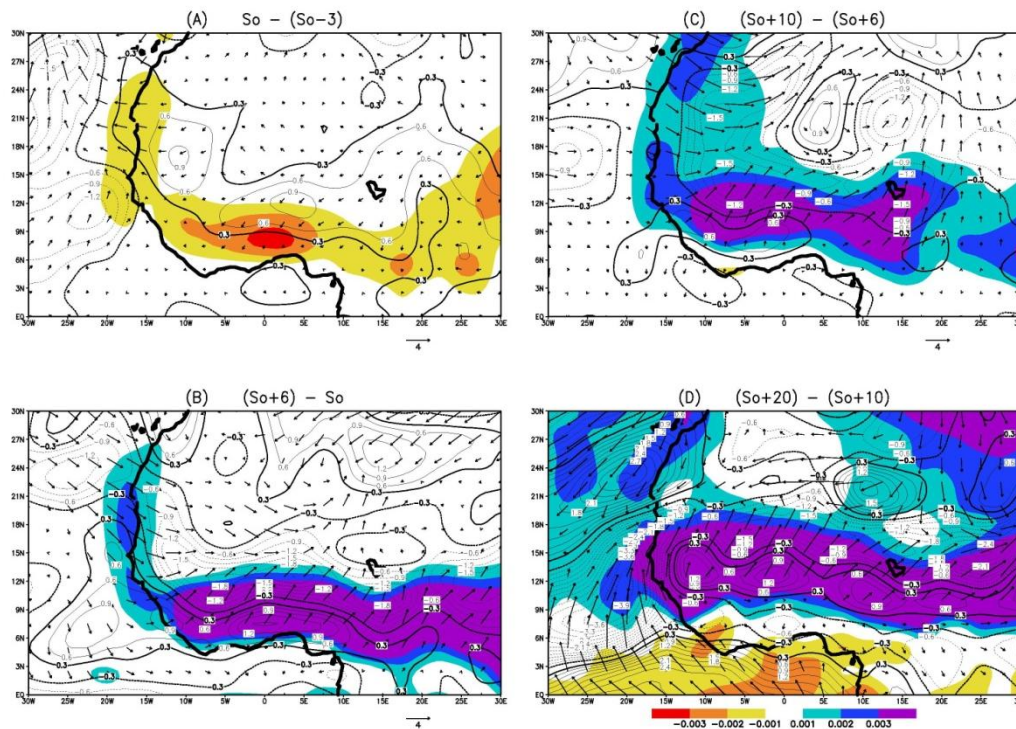


Figure 3.3 : Anomalies de la circulation atmosphérique pendant les principales étapes d’une épidémie de MCS au Mali. Les couleurs représentent l’humidité spécifique à 1000 hPa (en Kg/Kg), les isolignes le module du vent à 1000 hPa et les vecteurs la vitesse horizontale du vent. Tiré de Sultan et al. (2005b).

Au vue de ces cartes, il apparaît clair qu’il pouvait exister un lien entre le renforcement de l’Harmattan et le déclenchement de l’épidémie. Encore faut-il trouver un indicateur atmosphérique pouvant être corrélé directement à l’évolution temporelle des dates de démarrage de la maladie. On s’est donc attaché par la suite à élaborer cet indicateur à partir d’analyses statistiques appliquées aux réanalyses NCEP. Une Analyse en Composantes Principales normée (ACP ; Richman 1986 ; Lebart et al. 1997) a été appliquée sur les champs hebdomadaires du module du vent et l’humidité spécifique de basses couches pour extraire les deux premiers modes dominants. Les séries temporelles des deux composantes représentent très clairement l’évolution du cycle saisonnier de la circulation atmosphérique en Afrique et notamment l’alternance entre l’hiver et l’été. Elles permettent également de détecter précisément la date où la circulation d’Harmattan est la plus forte, date que l’on a appelée le maximum de l’hiver. Ces deux composantes montrent une évolution très proche de celle du nombre de cas de méningite au Mali avec une rupture de pente très nette pour les deux composantes correspondant au démarrage de l’épidémie et au maximum de l’hiver à la 6^{ème} semaine (Sultan et al. 2005b). Plus remarquable encore, on trouve on trouve une corrélation très forte de 0.92 sur les années de 1994 à 2002 traduisant le fait que le moment du maximum de l’hiver explique plus de 85% des occurrences de démarrage de la saison épidémique au Mali ($R^2=0.85$), ce qui signifierait qu’un hiver précoce (tardif) au Mali est associé à un démarrage précoce (tardif) de l’épidémie de méningite (Fig.3.4).

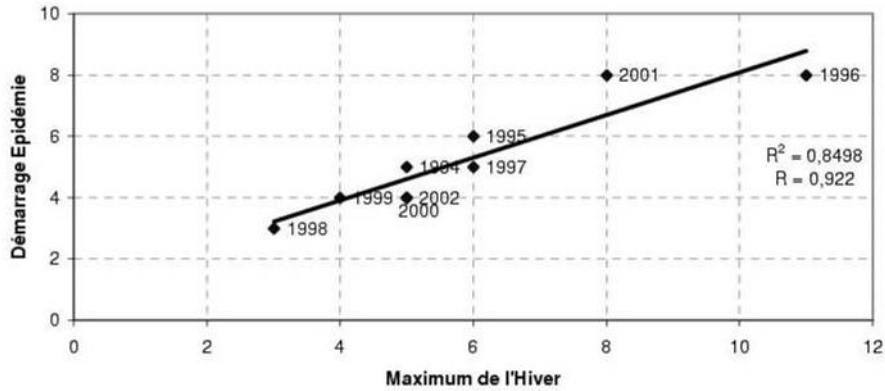


Figure 3.4 : Relation entre la semaine du démarrage de l'épidémie au Mali (ordonnées) et la semaine du maximum de l'hiver (abscisses). La semaine du maximum de l'hiver a été déterminée à partir d'une analyse en composantes principales sur le module du vent issu des réanalyses NCEP. Tiré de Sultan et al. (2005b).

La construction de ce type d'indices climatiques par leur cohérence avec le démarrage et la progression de l'épidémie au Sahel offre un potentiel important en matière de prévision et de mise en place d'études de risque de la maladie en Afrique. A défaut de prévoir l'intensité de l'épidémie, les données de réanalyses, au pas de temps de la semaine, présentent donc un intérêt évident pour les services de santé pour prévoir la date de démarrage de cette maladie. Ces prévisions pourraient ainsi être utilisées pour orienter la stratégie vaccinale.

3.3 Les variations interannuelles des épidémies

Si la méningite est endémique dans de nombreux pays d'Afrique, c'est-à-dire qu'elle sévit chaque année, il existe des variations très fortes d'une année sur l'autre du nombre de cas par pays. Certains auteurs (Broutin et al. 2007) décrivent une périodicité à 8-12 ans dans la résurgence d'épidémies massives avec un pic en 1996 qui a recensé plus de 200 000 cas. Cependant, bien que d'une importance capitale pour les services de santé, l'origine de ces fluctuations d'une année sur l'autre demeure encore pratiquement inconnue. Le plus vraisemblable c'est que l'occurrence de très fortes épidémies résulte d'interactions complexes entre des phénomènes sociaux, la transmission d'un nouveau sérotype plus virulent, l'immunité des populations, le portage asymptomatique et les conditions environnementales (Yaka et al. 2008). Fort des résultats prometteurs reliant les conditions climatiques et le démarrage de l'épidémie au Mali (Sultan et al. 2005b) mais aussi de ceux de Thomson et al. (2006) qui ont construit un modèle linéaire de prévision des épidémies en Afrique à partir de variables environnementales (type de sol, quantité de poussière, évolution de la végétation, nébulosité et pluie), je me suis intéressé à isoler et quantifier la part du climat dans la résurgence de fortes épidémies en Afrique de l'Ouest. J'ai alors tenté de répondre à deux questions avec Pascal Yaka dans le cadre de sa thèse de doctorat: les années fortement ou faiblement épidémiques peuvent-elles être discriminées par des situations atmosphériques particulières ? Et si oui, peut-on utiliser cette information climatique pour anticiper les années les plus meurtrières et construire un modèle de prévision ? Pour répondre à ces questions, nous avons commencé par définir une hypothèse *a priori* sur le lien causal entre le climat et la maladie. Mentionner cette étape peut paraître trivial puisqu'elle est un pré-requis indispensable pour toute étude statistique croisant deux phénomènes différents mais elle est fondamentale pour attester de la robustesse d'un modèle statistique, bien plus qu'un test statistique de significativité, en particulier dans le contexte des études sur la méningite. Je reviendrai d'ailleurs sur ce point dans la section suivante. Notre hypothèse de départ, tirée de

la littérature est qu'il existe un lien causal entre un hiver sec et venteux et une fragilisation de la population qui favoriserait l'invasion du méningocoque. Pour confirmer cette hypothèse, nous devrions trouver une corrélation positive entre les marqueurs de ces conditions hivernales (fort vent d'Harmattan, sécheresse) et l'incidence de la méningite. Etant entendu que le climat n'est pas le seul facteur qui conditionne l'occurrence de la maladie, l'absence de corrélation n'indiquerait pas forcément une absence de relation mais peut mettre en évidence que le climat n'est pas un facteur dominant. On s'est donc attaché à vérifier cette hypothèse en utilisant les recensements nationaux de cas de méningite de l'OMS sur la période 1968-2005 et les réanalyses NCEP en se focalisant sur les deux pays les plus affectés par la maladie, le Burkina Faso et le Niger.

Les relations entre le climat et la méningite ont dans un premier temps été mis en évidence à travers une analyse composite. Pour chacun des deux pays, nous avons classé les années en deux groupes : les années fortement épidémiques (où le nombre de cas dépasse le troisième quartile) et les années faiblement épidémiques (où le nombre de cas est inférieur au premier quartile). Nous avons alors moyenné séparément les variables atmosphériques pour les années fortement et faiblement épidémiques et calculé la différence entre les deux moyennes. La figure 3.5 représente cette différence pour les mois qui précèdent le démarrage de l'épidémie.

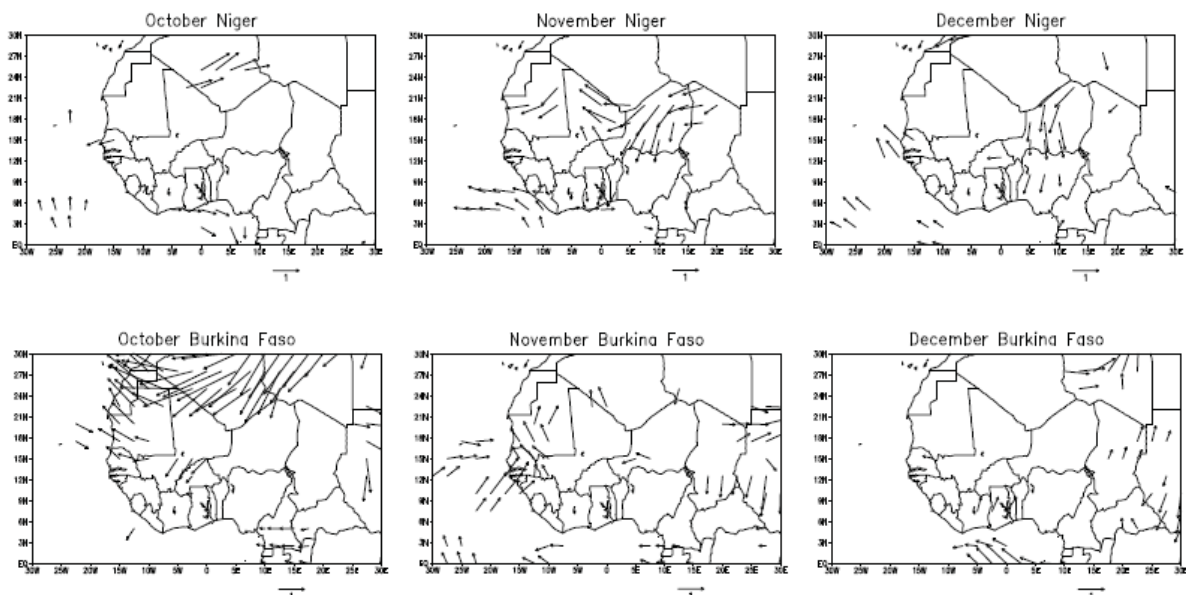


Figure 3.5 : Différence dans les champs de vent NCEP en surface entre les années fortement et faiblement épidémiques. Seules les valeurs significatives à 5% selon un test de Student sont représentées. Tiré de Yaka et al. (2008)

Les résultats montrent clairement que les années épidémiques au Niger sont associées à des vents d'Harmattan plus fort sur le Niger aux mois de Novembre et de Décembre de l'année précédant le pic épidémique. Le signal est moins marqué au Burkina Faso bien que l'on trouve un renforcement des vents d'Harmattan sur le pays au mois d'Octobre de l'année qui précède le pic épidémique. Les corrélations entre l'incidence annuelle de la maladie et les variables climatiques ont alors été calculées pour ces mois d'hiver et les variables climatiques les plus corrélées ont été sélectionnées comme prédicteurs dans un modèle linéaire au Niger et au Burkina Faso reliant une ou plusieurs variables atmosphériques explicatives et l'incidence annuelle de la maladie. Les résultats du modèle linéaire sont présentés pour chaque pays dans la figure 3.6.

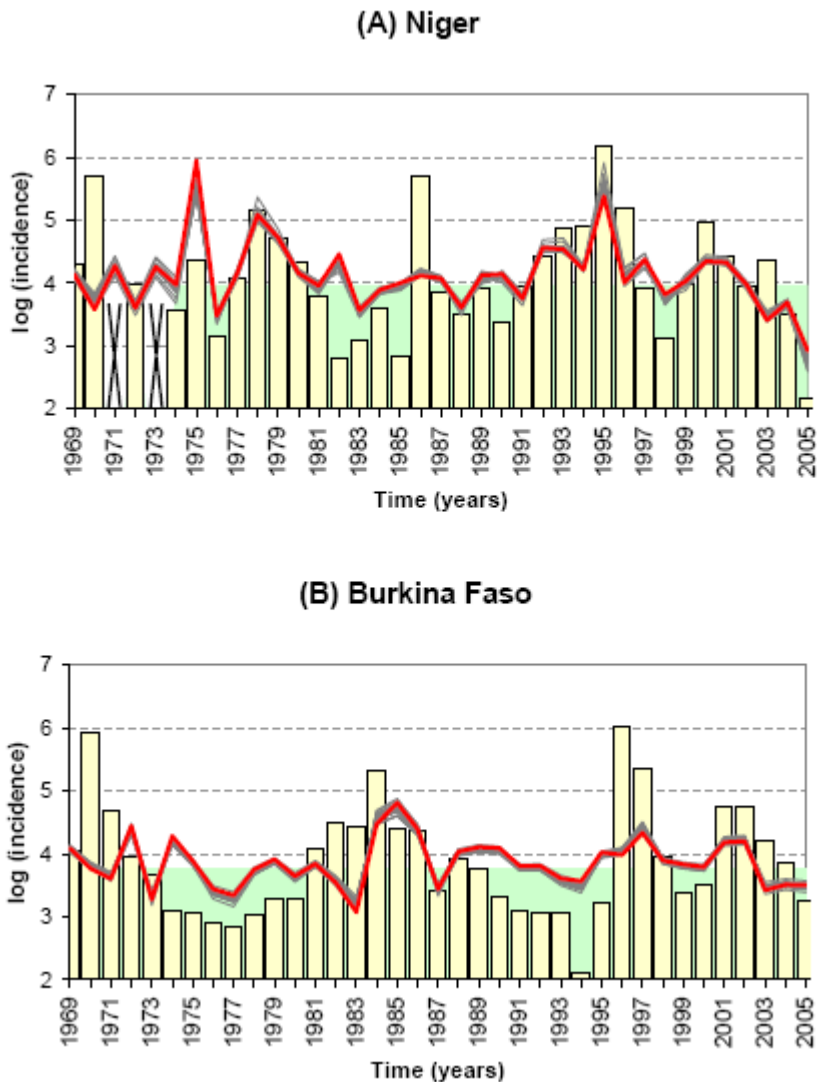


Figure 3.6 : (A) Logarithme de l'incidence annuelle de la méningite au Niger (jaune) et résultats de la prévision statistique basée sur une régression linéaire avec les vents d'Harmattan en hiver (rouge). (B) idem mais pour le Burkina Faso. Tiré de Yaka et al. (2008).

La corrélation entre la prévision et les incidences observées de la méningite est encourageante au Niger puisqu'elle atteint 0.62 et se maintient à 0.50 en réalisant une validation croisée. La variabilité décennale est bien reproduite par le modèle avec des années épidémiques comme 1978 et 1995 qui sont bien prédites par le modèle. En revanche, le modèle sous-estime deux années fortement épidémiques (1970 et 1986). Les résultats sont en revanche non significatifs au Burkina Faso avec une corrélation de 0.42 qui tombe à 0.33 en réalisant une validation croisée. Cette performance est d'ailleurs inférieure à celle d'un modèle simple uniquement basé sur la persistance de la maladie d'une année sur l'autre. Une des hypothèses sur cette faible performance pourrait être que le poids relatif du facteur climatique dans l'occurrence d'années fortement épidémiques est plus faible au Burkina Faso qu'il ne l'est au Niger.

Ce type d'analyses statistiques basées sur les corrélations doit être cependant interprété avec précaution même si il montre dans le cas du Niger des corrélations significatives. En effet, vu qu'il n'existe pas de mécanisme physiologique précis sur les relations entre le climat et la maladie (il n'existe pas de modèles mécanistes comme pour l'agronomie), ces corrélations peuvent être liées au hasard et n'impliquent pas nécessairement une causalité. Ceci d'autant

que les corrélations les plus fortes que l'on observe, et c'était également le cas pour l'étude précédente de Thomson et al. (2006), impliquent les conditions climatiques en hiver (octobre à décembre) et que le pic de méningite se situe 3 à 4 mois plus tard en mars ou en avril de l'année suivante. Rappelons ici que la période d'incubation de la maladie est de quelques jours. Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer ce décalage et les corrélations que l'on met en évidence. D'abord, il est possible que la vulnérabilité de la population à l'infection soit accrue par une longue exposition aux vents forts et à la sécheresse ; les conditions climatiques du début de l'hiver (octobre à décembre) devenant alors importantes pour conditionner l'ampleur de l'épidémie à venir. Ensuite, il est également possible que l'effet du climat soit beaucoup plus rapide et que de forts vents d'Harmattan au début de l'hiver soient responsables de cas précoces de la maladie. Ce sont alors ces cas précoces, induits par l'effet climatique, qui seraient alors à l'origine de l'ampleur finale de l'épidémie par la transmission directe de personne à personne (Trotter and Greenwood 2007 ; Tikhomirov et al. 1997). L'importance des cas précoces a d'ailleurs été soulignée par l'OMS qui interprète un grand nombre de cas précoces comme un signe précurseur d'une épidémie de grande ampleur. Cette seconde hypothèse est d'ailleurs confirmée par l'observation du nombre de cas mensuels au Burkina Faso (Fig.3.7a) où il existe une relation claire entre les cas précoces et l'ampleur finale de l'épidémie. De plus, j'ai pu confirmer cette relation par un modèle épidémiologique simple de type SI (Susceptible - Infecté) qui s'utilise classiquement dans le cas de maladies à transmission directe comme la méningite. Ce modèle montre en effet qu'une augmentation du nombre de cas initiaux de la maladie a un effet sur l'ampleur finale de la maladie (Fig.3.7b).

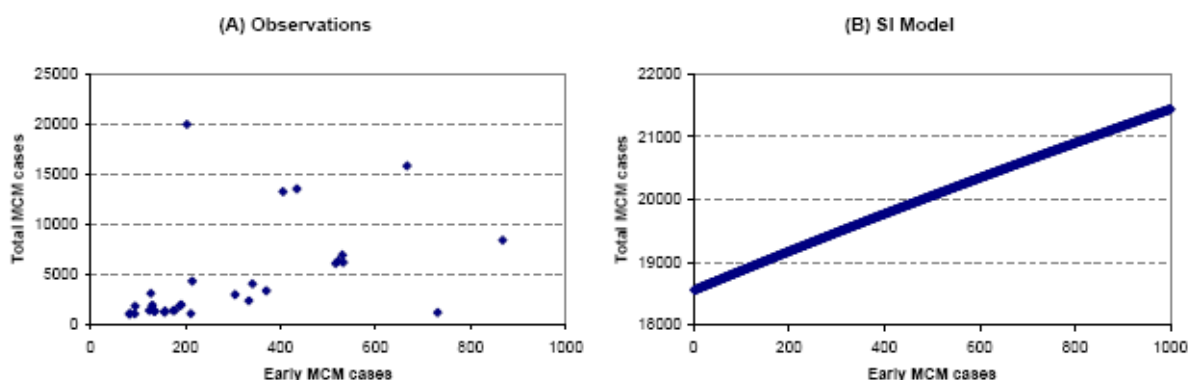


Figure 3.7: (A) Relation entre le nombre de cas durant le pic épidémique (janvier à avril) et le nombre de cas précoces (octobre à décembre) détectée à partir d'un jeu de données mensuelles du nombre de cas au Burkina Faso entre 1961 et 2005. (B) Sensibilité d'un modèle SI à l'augmentation du nombre initial d'individus infectés. Le modèle SI a été calibré pour reproduire les caractéristiques de l'épidémie telle qu'elle est observée au Burkina Faso. Tiré de Yaka et al. (2008).

Dès lors que les corrélations que l'on a calculées entre le climat et la maladie peuvent être étayées par des hypothèses solides, une confiance plus importante peut leur être accordée même si elles ne restent que purement exploratoires.

3.4 Conclusions, limites et perspectives

Les études que j'ai menées ont été parmi les premières à quantifier les liens entre le climat et la méningite. La construction de ce type d'indices climatiques par leur cohérence avec le démarrage et l'amplitude de l'épidémie au Sahel offre un potentiel important en matière de prévision et de mise en place d'études de risque de la maladie en Afrique. Ces

prévisions pourraient ainsi être utilisées pour orienter la stratégie vaccinale par les services opérationnels de santé. En effet cette stratégie est souvent critiquée car elle n'intervient que lorsque l'épidémie est déclarée sans réelle tentative d'anticipation. La prise en compte d'indicateurs environnementaux comme ceux que j'ai développés pourraient ainsi servir à produire des indicateurs d'alerte ou des cartes de risque qui, combinés à d'autres indicateurs (immunité, facteurs sociaux), pourraient améliorer l'efficacité de la stratégie vaccinale. C'est d'ailleurs le travail de Pascal Yaka, maintenant à la Direction Nationale de la Météorologie au Burkina Faso, qui collabore directement avec les services de santé pour s'assurer de l'amélioration et de la diffusion de ces indicateurs d'alerte.

Cependant il faut être conscient qu'il existe encore actuellement des limites importantes au développement et à l'utilisation de ce type de système d'alerte précoce qui sont de trois types:

- La mise en place de système d'alerte pose un problème d'échelle important où l'influence du climat sur la maladie, bien qu'indiscutable, est certainement modulée par l'échelle à laquelle on appréhende la dynamique de l'épidémie. Dans mes travaux, j'ai montré qu'il est nécessaire de se placer à une grande échelle pour les études croisant le climat et les épidémies de méningite (par exemple l'échelle nationale) pour lisser l'hétérogénéité locale et faire ressortir le forçage climatique. Cependant cette échelle présente un intérêt moindre pour la mise en place de systèmes d'alerte précoce.
- Bien que la prévision de l'ampleur de l'épidémie soit le paramètre-clé dans la mise en place d'un système d'alerte précoce, il existe des limites importantes dans sa prévisibilité. Drake (2006) a démontré en étudiant la dynamique de plusieurs maladies infectieuses très contagieuses que le nombre final de malades à la fin d'une épidémie était extrêmement difficile à appréhender de façon précise et déterministe du fait que de petites variations à très petite échelle (contact à au sein de ménages/communautés, contacts entre ces ménages/communautés) ont des répercussions à grande échelle sur l'ampleur de l'épidémie. Or les systèmes d'alerte précoce ne considèrent que les facteurs de grande échelle qui contrôlent la maladie.
- Les résultats des études reliant la méningite et le climat relèvent d'analyses statistiques comparatives entre des séries environnementales et des données d'incidence de la maladie et il n'existe aucune étude décrivant leur lien causal. Or les données sur lesquelles se basent ces statistiques sont très imparfaites et insuffisantes. Par exemple pour les données d'incidence qui sont généralement utilisées dans ce type d'étude pour décrire la maladie, une source d'erreur non négligeable réside dans le fait que la majeure partie des déclarations de cas de méningite se fonde sur un diagnostic clinique et non biologique. De plus l'incidence de la maladie est une variable très intégrée masquant un certain nombre de paramètres comme le portage de la maladie, la probabilité du passage de la bactérie vers les méninges et la promiscuité qui peuvent chacun être influencés par le climat mais de manière différente. Pour ces raisons, j'ai essayé d'insister tout au long de ce chapitre sur les précautions à prendre lorsqu'on mène ce type d'études statistiques. A titre d'exemple de ce que je considère un peu comme une dérive dans les études climat-santé, Thomson et al. (2006) ont construit un modèle linéaire permettant d'appréhender l'ampleur des épidémies pour plusieurs pays soudano-sahéliens à l'échelle des districts en se basant sur une sélection de variables environnementales telles que le type de sol, la quantité de poussière, l'évolution de la végétation, la nébulosité et la pluie. Ils montrent que près de 40% de la variabilité interannuelle de l'incidence de la maladie peut être expliqués par des anomalies de pluie en août et en janvier et de quantité de poussière en avril et en octobre (Tab.3.1). C'est un résultat impressionnant. Cependant, la variable

explicative dominante de leur modèle est la quantité de poussière au mois d'avril, c'est-à-dire au moment du pic épidémique, qui montre une corrélation négative avec l'incidence de la maladie. Autrement dit, moins il y a de poussières au moment du pic épidémique et plus il y a de cas de méningite. Les auteurs ne fournissent aucune explication sur cette relation contre-intuitive qui pose de sérieuses questions quant à la robustesse de leurs résultats.

Predictands*	Standardised coefficients			
	All	Savannah	Grassland	Barren
August rainfall anomaly	-0.246	-0.241	-0.309	0.438
January rainfall anomaly 0 or 1	-0.258	-0.143	-0.425	0.349
April aerosol index anomaly	-0.339	-0.383	-0.260	-0.435
October aerosol index anomaly	0.261	0.298	0.187	-0.069
Adjusted R ²	0.382	0.433	0.372	0.187

* All variables were significant $P < 0.001$.

Tableau 3.1: Corrélations entre plusieurs variables atmosphériques mensuelles et l'incidence annuelle de la méningite au Togo, Mali, Burkina Faso et Niger sur la période 1989-1999 à l'échelle des districts (Thomson et al. 2006).

Même si je ne compte plus m'investir dorénavant sur ce thème, plusieurs pistes peuvent être dégagées à la suite de ce travail. D'abord si je me suis focalisé sur la circulation atmosphérique comme prédicteur de l'occurrence d'une épidémie, il reste à explorer les liens entre cette maladie et la poussière qui est un facteur important pour l'invasion du méningocoque. Ce lien fera l'objet d'études approfondies dans le cadre du projet ADCEM financé par le GIS CES et porté par Béatrice Marticorena (LISA) et Nadège Martiny (CRC). Ce projet vise en effet à développer une approche intégrée de l'étude du lien entre aérosols, climat et méningites afin de contribuer à la mise au point d'un système de prévision des conditions environnementales favorables au développement des épidémies en Afrique de l'Ouest. Une autre piste intéressante serait de regarder comment évolue dans le futur les indicateurs climatiques liés à la maladie. On pourrait ainsi analyser les projections du vent d'Harmattan ou de l'humidité au Sahel en hiver dans les différents modèles de l'IPCC et les traduire en termes d'évolution future du risque associée à la maladie. Ces projections pourraient d'ailleurs être réalisées à d'autres échelles de temps : l'échelle décennale qui peut être particulièrement importante pour les acteurs de la santé ou l'échelle plus courte de la prévision saisonnière.

Synthèse

Dans ce chapitre, j'ai mis en évidence au moyen d'études statistiques qu'il existait des facteurs environnementaux susceptibles de contrôler la dynamique des épidémies de méningite au Sahel. A l'échelle saisonnière, le déclenchement des épidémies de méningite coïncide avec le pic hivernal où les vents d'Harmattan sont forts et la sécheresse marquée. A l'échelle interannuelle, il semble exister un lien entre les plus fortes épidémies et l'intensité des vents d'Harmattan au début de l'hiver. La construction de ce type d'indices climatiques par leur cohérence avec le démarrage et l'amplitude de l'épidémie au Sahel offre un potentiel important en matière de prévision et d'études de risque de la maladie en Afrique pouvant ainsi être utilisées pour orienter la stratégie vaccinale par les services opérationnels de santé même s'il faut rester conscient de leurs limites.

4. Le climat et l'agriculture en Afrique de l'Ouest



Un agriculteur sarclant son champ de mil au Sahel. B. Muller / AMMA. Sénégal 2007.

4.1 Contexte et objectifs

4.1.1 Un lien étroit entre le climat et la productivité

Le climat a une influence très forte sur l'agriculture qui est considérée comme l'activité humaine la plus dépendante des variations climatiques (Oram 1989; Hansen 2002). Les impacts du climat sur l'agriculture varient d'une région du globe à une autre avec des conséquences socio-économiques particulièrement importantes dans les pays en développement des latitudes tropicales. En effet, ces pays connaissent une grande variabilité climatique, comme le régime de mousson en Inde et en Afrique de l'Ouest ou encore l'influence des événements El Niño sur le continent américain (Challinor et al. 2003) et dans bien des cas leur pauvreté endémique augmente le risque et la gravité des catastrophes naturelles (PNUD 2004).

Les populations rurales de l'Afrique sub-saharienne sont particulièrement exposées aux aléas climatiques dans la mesure où elles sont étroitement dépendantes de l'agriculture pluviale qui représente près de 93% des terres cultivées. Rappelons en effet que 80% des céréales consommées en Afrique sub-saharienne proviennent de cette production traditionnelle et que le secteur agricole emploie 70% de la totalité de la main d'œuvre (FAO 2003), représentant entre 15 et 20% du PIB. Outre cette dépendance, la croissance rapide de ces populations et leur pauvreté, ne leur permettant pas un accès aux adaptations technologiques (mécanisation, engrais, irrigation), constituent des facteurs aggravant des impacts socio-économiques du climat (PNUD 2004). En effet les faibles moyens de l'agriculture pluviale pour anticiper et enrayer les effets des fluctuations climatiques s'illustrent par une corrélation forte entre la productivité agricole et la pluviométrie. A titre d'exemple, la figure 4.1 montre le synchronisme entre l'évolution du rendement des céréales au Niger et de la pluviométrie depuis le milieu des années 1960.

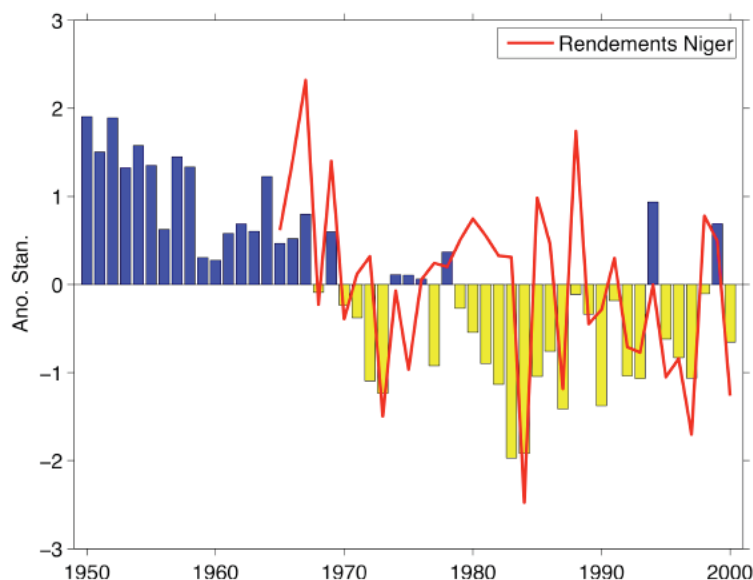


Figure 4.1 : Précipitations annuelles (histogramme) et rendement des céréales (courbe rouge) au Niger. Les précipitations exprimées en anomalies standardisées par rapport à la période 1950-2000. Les rendements, tirés des statistiques nationales de la FAO, sont exprimés en anomalies standardisées par rapport à la période 1965-2000.

Cette vulnérabilité face au climat s'illustre également par le fait que depuis les années 1970 les plus grandes famines ayant nécessitées un recours à l'aide alimentaire internationale (1974, 1984/1985, 1992 and 2002) sont entièrement ou en partie dues aux variations du climat (Dilley et al. 2005). Plus récemment si la crise alimentaire de 2010 au Sahel, qui a touché plus d'un tiers de la population au Niger, a été provoquée par plusieurs causes (fluctuations des prix du marché, faiblesse du réseau de distribution de l'eau), elle a été déclenchée par un déficit de pluie en 2009 qui a réduit la production alimentaire. Dans ce contexte, *être capable de mieux comprendre et d'anticiper les fluctuations climatiques et leurs conséquences sur l'agriculture* constitue donc un enjeu majeur en terme de développement et de sécurité alimentaire en Afrique sub-saharienne.

4.1.2 Une pression accrue dans le futur

Si l'Afrique sub-saharienne est aujourd'hui fréquemment confrontée à l'insécurité alimentaire, qu'en sera-t-il dans le futur ? Un regard rétrospectif sur l'évolution de ces dernières années donne une image assez pessimiste pour le futur. En effet, en dépit d'une hausse de la production alimentaire, le très fort accroissement de la population a entraîné une augmentation du taux de pauvreté et de malnutrition en Afrique plus rapidement que n'importe où dans le monde. La comparaison de l'évolution de la production agricole par habitant pour les différentes régions en développement du globe (Fig.4.2) est assez révélatrice du retard pris par l'Afrique sub-saharienne en matière d'autosuffisance alimentaire.

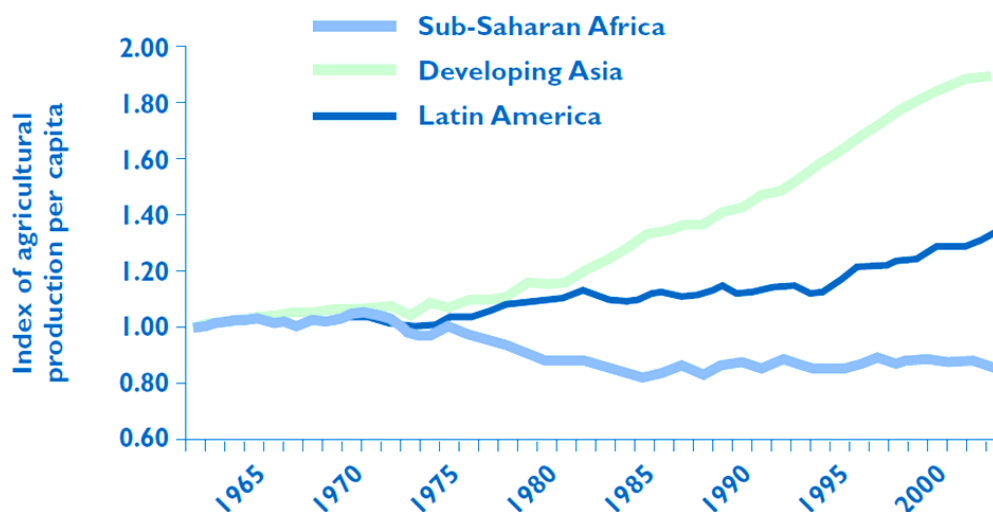


Figure 4.2 : Evolution de la production agricole par habitant et par région entre 1961 et 2002 (données FAOSTAT ; Haggblade et al. 2004).

Or si l'on tient compte des projections des besoins alimentaires à l'horizon 2050, au moment où selon les Nations Unis la planète aura atteint le maximum de sa population, l'effort en termes d'accroissement de la production alimentaire devrait être extrêmement élevé : entre 2000 et 2050, l'Afrique devrait, selon Collomb (1999), plus que quintupler sa production ! Le futur de cette région dépend donc de la capacité du secteur agricole à relever le défi de nourrir sa population qui croît rapidement. Or, ce défi sera d'autant plus difficile à relever que le changement climatique est aujourd'hui à l'œuvre et ne sera certainement pas sans conséquences sur l'agriculture en Afrique comme ailleurs. Le 4^{ème} rapport du GIEC (2007) a en effet alerté la communauté internationale d'une augmentation de la température partout

dans le monde ainsi que d'une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité des aléas météorologiques majeurs comme les sécheresses, citant l'Afrique comme le continent le plus vulnérable aux changements climatiques. Il n'y a pas de doute qu'une modification de l'intensité et/ou du régime des précipitations affectera les systèmes agricoles et pastoraux en Afrique sub-saharienne (CGIAR 2009). L'agriculture irriguée, comme la culture du riz qui joue un rôle important pour nourrir la population urbaine en Afrique, sera également affectée pas seulement à cause d'une possible modification de la disponibilité en eau mais à cause de l'augmentation des températures qui peut entraîner des pertes conséquentes de rendement (Dingkuhn 1995; Dingkuhn et Miezán 1995; Dingkuhn et al. 1995). Cependant même si le 4^{ème} rapport du GIEC conclut sur un risque accru de famine dans le futur en conséquence des bouleversements climatiques, il existe encore aujourd'hui de nombreuses incertitudes quant aux impacts du changement climatique sur l'agriculture en Afrique sub-saharienne (Roudier et al. 2011b). Il apparaît donc crucial de pouvoir *fournir une image plus précise de l'évolution attendue du potentiel de production agricole en Afrique sub-saharienne dans le contexte du réchauffement climatique*. En outre l'enjeu est tel que malgré l'incertitude il faut d'ores et déjà *réfléchir aux options d'adaptation pour réduire la vulnérabilité de la population africaine à la variabilité et aux changements climatiques et augmenter la sécurité alimentaire*. L'adaptation sera fondamentale pour réaliser les objectifs du Millénaire fixés par les Nations Unies d'ici 2015, particulièrement en Afrique où c'est un enjeu de survie (EU 2007).

4.1.3 Mes quatre axes de recherche

C'est cette problématique autour du climat et de l'agriculture en Afrique sub-saharienne qui constitue le cœur de mon activité de recherche. J'ai commencé à l'aborder lors de ma dernière année de doctorat pour réellement la mettre en œuvre lors de mon séjour postdoctoral en 2004 au CIRAD au côté de C. Baron et M. Dingkuhn. Je m'attacherai donc dans ce qui suit à décrire la démarche, les résultats et les perspectives issus de cette recherche selon 4 axes étroitement liés : (i) le développement, la calibration/validation et l'application d'outils pour simuler les rendements à partir de l'information climatique, (ii) le couplage de ces outils avec la modélisation climatique, (iii) l'analyse des projections du changement climatique en termes de rendement agricole et (iv) l'adaptation des pratiques agricoles en utilisant l'information et la prévision climatique.

4.2 Transcrire les liens entre le climat et l'agriculture

Pour quantifier les liens entre le climat et l'agriculture, un pré-requis est de construire un modèle qui permet de transcrire l'information climatique (températures et/ou précipitations par exemple) en termes de variables agronomiques (rendements agricoles, biomasse). Ce type de modèle est particulièrement utile pour synthétiser les connaissances existantes sur les relations climat/plante, explorer des hypothèses comme des changements de climat ou de pratiques agricoles, identifier des variables clés où la recherche doit mettre l'accent, et construire des scénarios pour le futur. On distingue deux approches différentes visant toutes deux à quantifier la réponse de la productivité agricole aux variations climatiques : la modélisation empirique ou statistique et la modélisation mécaniste.

4.2.1 La modélisation empirique ou statistique

Des modèles agronomiques empiriques peuvent être construits à partir d'analyses statistiques reliant des observations agronomiques et des observations climatiques (voir par exemple Schlenker et Lobell 2010; Lobell et al. 2008). Cette approche a l'avantage d'être relativement simple et rapide à mettre en place et de focaliser directement sur des échelles ou des indicateurs pertinents pour les utilisateurs.

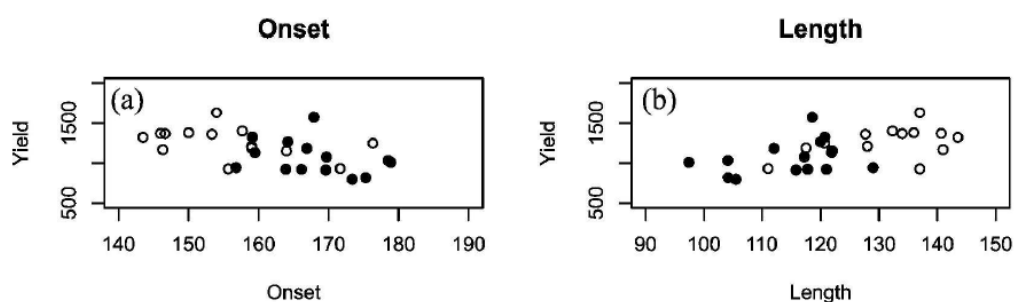


Figure 4.3 : Relations spatiales entre le rendement du coton au Cameroun et (a) la date de démarrage de la saison des pluies et (b) la longueur de la saison des pluies. Le rendement du coton (kg/ha) et les indices climatiques sont moyennés par unité administrative sur la période 1993-2003 (points noirs) ou sur la période 1993-1995 (points blancs). Tiré de Sultan et al. (2009b).

La figure 4.3 illustre le type de relation statistique que l'on peut établir entre le climat et le rendement à travers l'exemple de la culture du coton au Cameroun. Dans le cadre de la thèse de doctorat de Marthe Bella-Medjo et en collaboration avec la SODECOTON, qui est l'organisme qui encadre la culture cotonnière au Cameroun, on a pu montrer un lien fort entre le démarrage des pluies et le rendement du coton, avec des rendements d'autant plus forts que la saison des pluies commence tôt et dure longtemps (Sultan et al. 2009b). Cette relation, valable à la fois pour expliquer les variations spatiales et interannuelles du rendement peut ainsi être utilisée pour prédire l'évolution du rendement du coton.

Il est important de noter que selon l'échelle considérée, le score prédictif de ce type de modèle statistique mais aussi la nature et la hiérarchie des variables explicatives changent. Toujours sur l'exemple du coton, la figure 4.4 présente une analyse multi-échelle des relations entre le climat et la plante. On peut voir clairement qu'à mesure que l'on agrège spatialement et que l'on considère des unités spatiales plus grandes, la corrélation avec le climat augmente. Cette effet d'agrégation est lié au fait qu'à l'échelle locale, il existe une forte hétérogénéité des rendements liée à des différences de pratiques culturales, de type de sol et/ou à l'occurrence de maladies ou de parasites et le signal climatique est masqué par ces différents facteurs. En

moyennant un ensemble de parcelles, d'unités administratives, on lisse ces hétérogénéités pour mieux mettre en évidence le signal climatique. De fait le score prédictif de modèles empiriques basés sur la seule information climatique augmente.

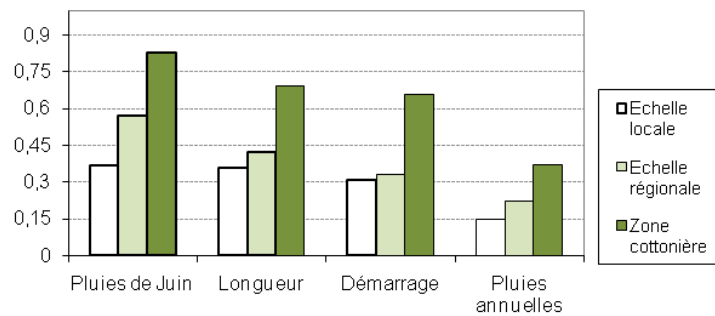


Figure 4.4 : Corrélations entre les variables climatiques et le rendement du coton sur la période 1993-2003 à trois échelles spatiales distinctes. Les barres en gras représentent les valeurs de corrélation significatives à 1%. Tiré de Sultan et al. (2009b).

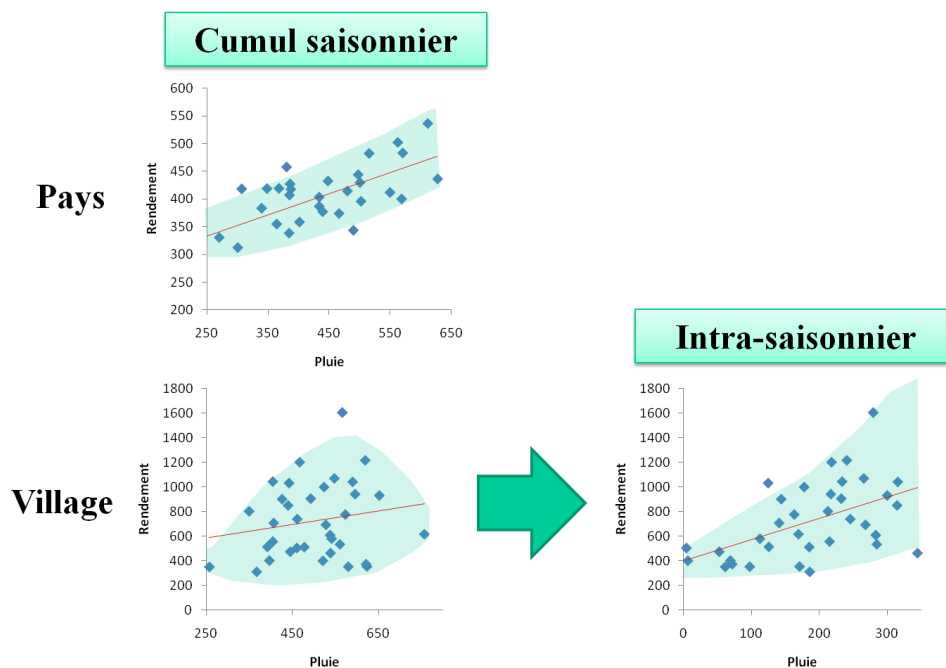


Figure 4.5 : (Haut) Rendement du mil (kg/ha) et pluies annuelles (mm/an) au Niger. (Bas) Rendement du mil (kg/ha) en moyenne pour 10 villages situés sur le degré carré de Niamey pour la période 2004-2008 et pluies annuelles (à gauche) et pluies cumulées pendant les phases critiques de la plante (floraison et remplissage des grains).

L'effet d'agrégation spatiale n'a pas seulement un rôle sur la qualité prédictive des modèles empiriques mais également sur la nature des variables explicatives à considérer. A grande échelle (nationale, régionale), des variables climatiques comme le cumul pluviométrique saisonnier est pertinent pour expliquer les variations du rendement alors que pour des échelles plus fines (village, parcelle) c'est la répartition des pluies et donc la variabilité intrasaisonnaire qui est dominante. C'est ce qu'illustre la figure 4.5 qui montre la relation étroite entre le cumul saisonnier des pluies et le rendement du mil au Niger à l'échelle nationale. Grâce aux données à l'échelle villageoise que j'ai recueillies en collaboration avec Seydou Traoré et Alhassane Agali de l'AGRHYMET et les observations fines de précipitations de l'observatoire AMMA-CATCH Niger, j'ai montré que cette relation ne se vérifie pas à l'échelle plus fine. A cette échelle, ce sont les quantités de pluies pendant les

phases critiques pour la plante (floraison et remplissage des grains) qui déterminent en partie les variations observées de rendement du mil.

Enfin, l'intensité des relations entre le climat et la plante et donc la qualité des modèles prédictifs varient selon la région considérée. L'intensité de la relation entre un indicateur climatique et le rendement d'une culture est d'autant plus forte que la région considérée est soumise à une forte contrainte climatique. Dans une région semi-aride par exemple où le stress hydrique est fréquent, on pourra observer une corrélation plus forte entre un indice pluviométrique et le rendement que dans une zone où la pluie n'est pas limitante (Fig.4.6).

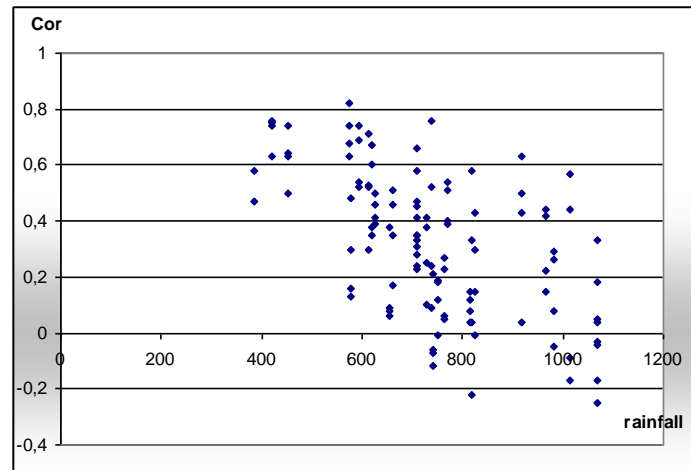


Figure 4.6 : Corrélations entre la pluie annuelle et le rendement des cultures (maïs, coton, arachide, mil et sorgho) sur 30 districts du Burkina Faso et 21 ans (1984-2004) en fonction de la pluie annuelle des districts (mm/an). Les données agronomiques proviennent de la base AGRISTAT du Burkina Faso. Tiré de Berg et al. (2009).

Si ces modèles empiriques par leur simplicité peuvent s'avérer extrêmement utiles pour représenter l'impact du climat sur l'agriculture, ils présentent néanmoins des limites inhérentes à leur construction. Ils nécessitent d'abord des jeux de données agronomiques et météorologiques de qualité sur de longues périodes ce qui peut être difficile à obtenir en Afrique de l'Ouest d'autant que lorsque l'on s'intéresse au rendement des cultures, un point de mesure correspond à une année entière. Il est alors difficile de construire un modèle statistique robuste en séparant bien un échantillon de données pour calibrer le modèle et un autre échantillon indépendant pour le valider. Beaucoup des modèles empiriques de la littérature peuvent dès lors surévaluer leur performance (« overfitting »). D'autre part, la plupart de ces modèles ont du mal à évaluer les effets non-linéaires du climat sur le rendement et/ou ne prennent en compte que des variables climatiques agrégées sur la saison et négligent les effets des variations intra-saisonnières (séquences sèches, démarrage, longueur et fin de la saison). De plus, leur application pour les projections futures du rendement dans le contexte du changement global peut être problématique car ils font l'hypothèse forte que les relations entre le climat et la plante sont stationnaires alors qu'elles peuvent changer dans le futur (avec une concentration de différente par exemple).

4.2.2 La modélisation mécaniste

L'étude des impacts du climat sur les cultures est loin d'être une discipline nouvelle. La compréhension des interactions entre la plante, l'atmosphère et le sol a pris son essor dans les années 80 à travers l'agrométéorologie où les acquis de cette connaissance ont été formalisés

grâce à l'avènement des moyens informatiques par des modèles de cultures mettant en équation la réponse des plantes cultivées aux conditions environnementales et météorologiques. Ces modèles mécanistes permettent pour une culture et/ou une variété de culture donnée de simuler, généralement sur une base journalière, la croissance et le développement de la plante au cours de son cycle phénologique afin de prédire la production de biomasse et le rendement à la fin de la saison de culture. Il existe un grand nombre de ces modèles à complexité variable, certains génériques (pouvant s'appliquer à un grand nombre de cultures), d'autres spécifiques à un type de culture ou à une variété : par exemple EPIC (Williams 1984), CERES (Ritchie et al. 1985), WOFOST (Diepen et al. 1989), CROPGRO (Boote et al. 1998), STICS (Brisson et al. 2002) ou encore APSIM (Keating et al. 2003). Dans le cadre de ma thèse et de mon séjour postdoctoral au CIRAD, j'ai eu l'occasion de me familiariser avec l'un d'entre eux, SARRAH (Dingkuhn et al. 2003; Baron et al. 2005; Sultan et al. 2005). Ce modèle a été développé spécifiquement pour simuler la réponse des céréales sèches (sorgho, mil) aux variations climatiques en milieu semi-aride (calibré et appliqué principalement au Sahel).

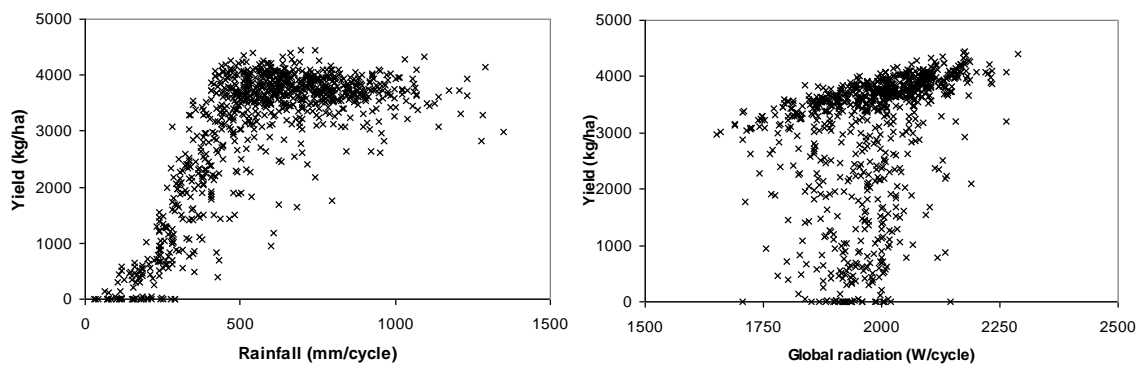


Figure 4.7 : (Gauche) Relations entre le rendement du mil simulé par SARRAH et la pluviométrie cumulée sur le cycle (mm/cycle) de culture pour 30 stations en Afrique de l'Ouest et 31 ans de la période 1950-1980. (Droite) Idem mais avec le rayonnement global (watt/cycle) en abscisse. Tiré de Baron et al. (2005).

La figure 4.7 met en évidence, à travers un ensemble de simulations du modèle, la capacité de SARRAH à représenter des relations non-linéaires entre les variables climatiques et le rendement du mil. On voit en effet que le rendement simulé peut varier du simple au double pour un même cumul pluviométrique enregistré au long du cycle de la plante, vraisemblablement la traduction de l'impact de la distribution intra-saisonnière des pluies. La figure montre également que si la pluviométrie est un élément déterminant pour le rendement simulé lorsque la pluie est comprise entre 0 et 500 mm pendant le cycle de la plante, c'est le rayonnement global par son effet sur la production de biomasse qui est le principal facteur explicatif quand la pluie n'est plus limitante (pluie par cycle supérieure à 500 mm). L'utilisation de ce modèle est donc particulièrement pertinente pour l'étude de l'impact de la distribution intra-saisonnière des pluies sur le rendement.

Un des défauts récurrents dans le développement de ce type de modèle est qu'ils sont généralement validés en milieu contrôlé en stations expérimentales et il est difficile d'estimer leur qualité prédictive en milieu réel paysan où les facteurs non-climatiques comme les stress biotiques (pestes, maladies, parasites) et/ les problèmes de fertilité du sol interviennent. Ils simulent donc ce que l'on appelle le rendement potentiellement atteignable sous contrainte climatique qui est souvent largement supérieur au rendement réel. Depuis mon séjour postdoctoral au CIRAD en 2004, j'ai poussé à la validation en milieu paysan du modèle

SARRAH et mis en place en collaboration avec l'AGRHYMET et le CIRAD un important protocole de mesures de rendement en milieu paysan (300 parcelles mesurées par an) qui a été maintenu depuis lors. Ce dispositif, intégré dans l'observatoire hydrologique AMMA-CATCH Niger, a été financé successivement par le projet PNRH OVNI puis par l'API-AMMA et compte parmi les rares observatoires multidisciplinaires (hydrologie, agronomie) de la région. Il est maintenant intégré dans la base de données AMMA. Il a permis, entre autres, de réaliser une validation des modèles de croissance de plante utilisés dans la région (DHC et SARRAH). La figure 4.8 montre les résultats de cette validation où le modèle parvient à expliquer 34% de la variance des rendements observés (Traoré et al. 2010).

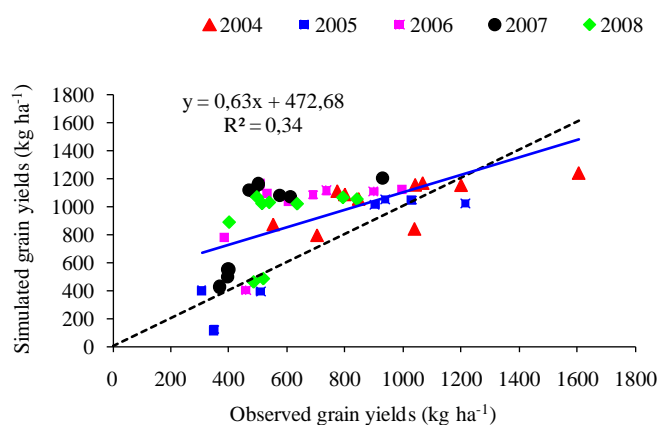


Figure 4.8 : Relation entre le rendement observé (10 villages sur 5 ans) et simulé par le modèle SARRAH pour la culture du mil au sud-ouest du Niger (sur le degré carré AMMA-CATCH Niger). Tiré de Traoré et al. (2010).

Cependant le modèle SARRAH, comme un certain nombre de modèles mécanistes de ce type, présente des limites qu'il est important de souligner. Il n'intègre pas le cycle de l'azote et n'est donc pas capable de tenir compte de la fertilisation azotée, il repose sur un certain dose d'empirisme avec des paramétrisations calibrées en parcelle expérimentale qui ne sont pas forcément reproductible d'une parcelle à l'autre et il nécessite souvent un grand nombre d'entrées (structure et caractéristique du sol, paramètres variétaux, itinéraires techniques) difficiles à recueillir sur le terrain. Enfin, et c'est une contrainte importante pour son utilisation dans le contexte du changement climatique, les processus décrits par le modèle sont valables à l'échelle de la parcelle agricole et son couplage avec des modèles de climat dont la résolution spatiale est beaucoup plus lâche (typiquement sur des mailles de 250 km de côté) demeure problématique. Mais je reviendrais plus tard sur ce problème d'incompatibilité d'échelles.

Pour mieux répondre à la problématique du couplage entre le climat et l'agriculture, un autre type de modélisation mécaniste a vu le jour récemment. Il aspire à faire converger autour d'un outil commun les objectifs scientifiques des communautés agronomiques et climatiques (Betts et al. 2005), à savoir : simuler de façon intégrée et cohérente les impacts du climat sur l'agriculture à grande échelle (et ainsi résoudre le problème du saut d'échelles sans recourir à des transformations *ad-hoc*), d'une part, et la rétroaction des zones cultivées sur le climat d'autre part. Il s'agit d'inclure une représentation des zones cultivées dans les modèles globaux de végétations (Dynamical Global Vegetation Models) qui sont aujourd'hui couramment utilisés avec les modèles globaux de climat pour étudier les interactions surface/atmosphère. A l'heure actuelle, plusieurs groupes de modélisation ont donc inclus une représentation des cultures dans leur modèle de biosphère : Kucharik et Brye (2003) ont inclus des modules spécifiques des cultures, issus du modèle EPIC, dans le modèle de

biosphère IBIS (Foley et al. 1996); Osborne et al. (2007) ont inclus le modèle de cultures GLAM dans le schéma de surface (MOSES) du modèle de climat du Met Office ; Bondeau et al. (2007) ont inclus plusieurs PFTs cultureux dans le modèle de biosphère Lund–Potsdam–Jena LPJ (Sitch et al. 2003), s’inspirant pour cela des modèles SWAT (Arnold et al. 1994) et SWIM (Krysanova et al. 2005) ; Lokupitiya et al. (2009) ont inclus des représentations spécifiques des cultures dans le Simple Biosphere Model SiB (Sellers et al. 1997) ; enfin, Gervois et al. (2004), puis Smith et al. (2010), ont associé le modèle de biosphère développé à l’IPSL, ORCHIDEE (Krinner et al. 2005), avec le modèle de culture STICS (Brisson et al. 2002) développé par l’INRA. En collaboration avec Nathalie De Noblet – Ducoudré, dans le cadre de la thèse d’Alexis Berg, on a choisi d’associer le modèle ORCHIDEE avec le modèle agronomique SARRAH pour donner naissance à un nouveau modèle ORCHIDEE-Mil (Berg et al. 2010a). L’enjeu dans le rapprochement de ces deux modèles et qui a constitué le cœur du travail d’Alexis Berg a consisté à extraire l’information fonctionnelle essentielle, suffisante, du modèle SARRAH, pour la transposer au sein du modèle de biosphère ORCHIDEE. Les modifications apportées à ORCHIDEE ont porté essentiellement sur la phénologie et la dynamique de la biomasse (schéma d’allocation en particulier), avec pour but de simuler le comportement de céréales telles que le mil et le sorgho en milieu tropical, particulièrement en Afrique de l’Ouest. La nouvelle version ORCHIDEE-Mil se comporte de façon très réaliste lorsqu’on la compare à des observations ou à des simulations SARRAH sur site, en station expérimentale (Bambey ; Fig.4.9) comme en milieu paysan, à la fois en termes de biomasses et de flux surface-atmosphère.

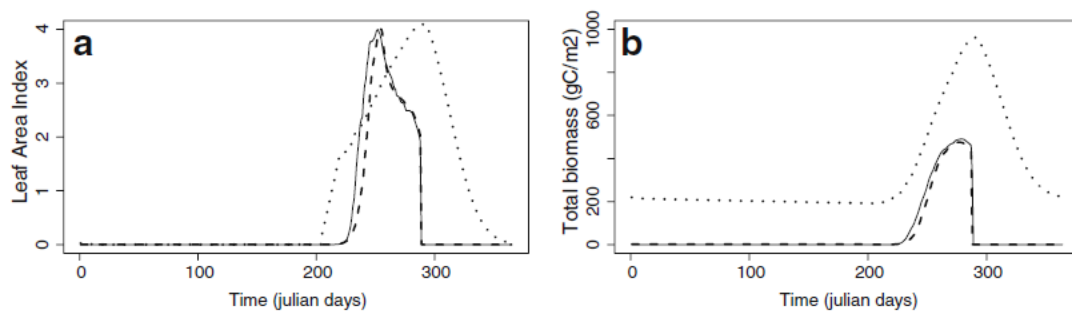


Figure 4.9 : Comparaison de l’indice de végétation LAI et de la biomasse simulés par la version standard d’ORCHIDEE (pointillés), le modèle SARRAH (ligne pleine) et le modèle ORCHIDEE-Mil (tiretés) pour l’année 1997 à Bambey au Sénégal. Tiré de Berg et al. (2010a).

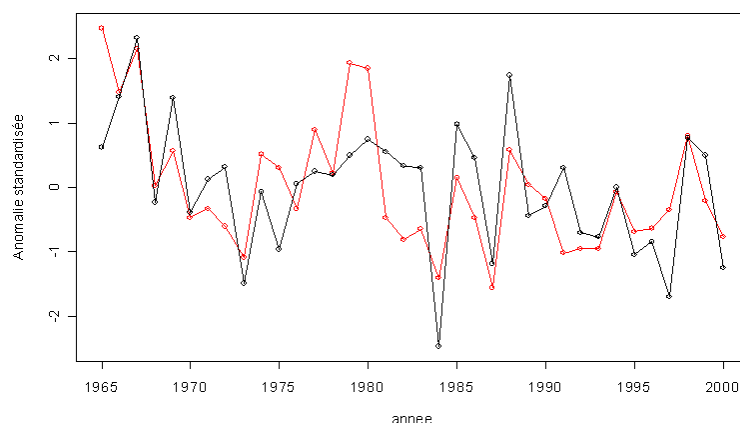


Figure 4.10 : Rendement national du mil observé au Niger (noir) et simulé par le modèle ORCHIDEE-Mil. Les données agronomiques sont issues de la FAO. Tiré de Berg et al. (2010a).

Le modèle a alors été appliqué sur toute l’Afrique de l’Ouest en utilisant comme forçage les réanalyses NCEP2 corrigées par le CRU (NCC ; Ngo Duc et al. 2005) sur la période 1965-2000 et le rendement simulé a été comparé avec les observations de rendement de la FAO pour plusieurs pays d’Afrique de l’Ouest. Pour plusieurs pays, dont le Niger (Fig.4.10), le modèle s’est montré particulièrement proche de l’observation (Berg et al. 2010a). La qualité prédictive du modèle augmente très fortement avec la qualité du forçage pluviométrique (Berg et al. 2010b) ce qui nous donne confiance dans la capacité du modèle à reproduire correctement les variations de rendement en fonction de la pluviométrie. Néanmoins, il est à noter que la qualité prédictive du modèle mécaniste ORCHIDEE-Mil à l’échelle nationale est inférieure à celle d’une simple relation empirique entre le cumul pluviométrique et le rendement national (Tab.4.1).

Pays	Corrélation pluie annuelle et rendement du mil	Corrélation rendement simulé et rendement observé du mil (FAO)
Mali	0.34	0.15
Niger	0.64	0.47
Burkina-Faso	0.58	0.53
Sénégal	0.49	0.29
Tchad	0.49	0.32
Afrique de l’Ouest	0.63	0.48

Tableau 4.1 : Comparaison entre la qualité prédictive du modèle mécaniste ORCHIDEE-Mil et d’une simple relation empirique avec la pluie annuelle pour reproduire les variations du rendement du mil pour plusieurs pays d’Afrique de l’Ouest.

4.2.3 Perspectives

Outre les multiples applications et les analyses de sensibilité des modèles agronomiques que je présenterai ultérieurement, plusieurs pistes sont envisagées pour la poursuite de ce travail. La comparaison des qualités respectives de prédiction du rendement des modèles empiriques et mécanistes sur plusieurs régions (y compris ailleurs qu’en Afrique dans d’autres régions tropicales) et plusieurs cultures (y compris des cultures irriguées comme le riz) me paraît très pertinente en ce sens qu’elle peut mettre en évidence des effets d’échelle, de qualité de données (de forçage ou de validation) et/ou du poids plus important d’une variable climatique. Par exemple, le modèle ORCHIDEE-Mil a été appliqué sur l’Inde pour simuler le rendement du sorgho et les scores de prédiction sont meilleures qu’en Afrique de l’Ouest et dépassent la simple corrélation avec les pluies annuelles sur la région. Comprendre les raisons pour lesquelles un modèle mécaniste est meilleur ou moins bon par rapport à un modèle empirique dans deux régions de mousson que sont l’Inde et l’Afrique peut apporter une vision originale à l’analyse comparée des deux régions. Je souhaiterais également étendre ces intercomparaisons de modèles agronomiques à d’autres modèles utilisés dans la littérature. Pour cela, je contribuerai au projet international AGMIP (Agricultural Model Intercomparaison Project), lancé en Décembre 2010, qui est le premier projet sur le modèle de CMIP (Coupled Model Intercomparaison Project) visant à analyser l’incertitude autour des prédictions agronomiques. Dans ce cadre, des simulations coordonnées seront réalisées dans plusieurs régions du globe avec un large nombre de modèles agronomiques. Je prévois de contribuer à ce projet en réalisant des simulations dédiées d’ORCHIDEE-Mil et de SARRAH et en analysant l’ensemble des simulations des autres modèles qui auront tournées sur l’Afrique et l’Inde.

4.3 Le couplage entre sciences du climat et sciences agronomiques

Les très fortes répercussions des aléas climatiques sur l'agriculture et la sécurité alimentaire en Afrique sub-saharienne auxquelles se rajoute la perspective du changement global ont poussé la communauté scientifique à orienter ses efforts vers le couplage entre le climat et l'agriculture de manière à ce que les progrès en termes de compréhension et de prévision de la variabilité et des changements de la mousson en Afrique puissent être bénéfiques pour les sociétés (Sultan et al. 2008). Cette approche doit tirer profit des progrès récents de chacune des deux disciplines: d'un côté, le développement continu, par les agronomes, de modèles de cultures mécanistes de plus en plus précis ont permis d'analyser et de quantifier les facteurs abiotiques (édaphiques, climatiques et chimiques) sur la croissance et la production des plantes; de l'autre, des progrès importants ont été accomplis par la communauté des climatologues dans le développement des modèles de circulation générale (MCG) pour prévoir le climat que ce soit pour la saison à venir ou bien pour le siècle prochain. Bien que les deux outils ont été développés séparément, l'intérêt de coupler les modèles agronomiques aux modèles de climat apparaît alors de façon immédiate : cela peut permettre, à l'échelle saisonnière, de prédire les rendements attendus des semaines voire des mois avant la récolte (Hansen et al. 2006), et à l'échelle pluri-décennale d'autre part, de réaliser des projections de la productivité agricole en réponse à l'évolution du climat (Berg et al. 2011). Cependant, et c'est l'objet de la section qui va suivre, ce couplage n'est pas chose facile en raison notamment (i) du saut d'échelles entre les modèles agronomiques conçus à l'échelle de la parcelle et les modèles climatiques qui peinent à descendre à une échelle plus fine qu'une maille de plusieurs centaines de kilomètres de côté, et (ii) de la très forte sensibilité des modèles agronomiques à la qualité du forçage climatique en entrée, très peu compatible avec les biais des modèles climatiques.

4.3.1 Le problème des échelles

La nécessité de la désagrégation

Pour décrire le climat, les MCG réalisent une mise en équation de la dynamique atmosphérique et océanique, des processus d'interface mer-glace et atmosphère-surface. Ces modèles résolvent les équations hydrostatiques / non-hydrostatiques de la mécanique de fluides dans un nombre discret d'instantants dans le temps et de points dans l'espace, en substituant le continuum par une grille spatiale de points dont les dimensions déterminent l'échelle minimum des phénomènes qui peuvent être résolus par les équations (Snell et al. 2000, Herrera et al. 2006). Parce que réduire la résolution de cette grille augmente exponentiellement le temps de calcul des simulations – et n'est d'ailleurs pas le premier facteur pouvant améliorer leurs performances –, la résolution de ces modèles s'établit typiquement autour de 200 km. Du fait du fonctionnement des MCG, la valeur des variables climatiques simulées pour un point de grille s'apparente à une valeur moyenne sur cette maille de 200 km de côté (Katz 2002). Or les modèles de cultures sont pour la plupart conçus, calibrés et validés à l'échelle de la parcelle agricole: l'estimation des impacts agronomiques requiert en effet d'appréhender des processus impliquant la plante, le sol et l'atmosphère à fine échelle. Même en admettant que le MCG simule parfaitement la moyenne climatique sur la maille, un modèle agronomique fonctionnant habituellement à l'échelle de la parcelle, forcé avec de telles variables, ne simulera en aucun cas le rendement agricole moyen de cette zone de 200x200 km. En effet, parce que les modèles de cultures sont fondamentalement non linéaires, la simulation de la moyenne n'équivaut pas à la moyenne des simulations. L'étude que j'ai menée en collaboration avec Christian Baron illustre parfaitement ce propos (Baron et

al. 2005). Le modèle agronomique SARRAH, forcé avec la moyenne de 17 stations météorologiques situées au sein d'une même maille MCG en Afrique de l'Ouest, surestime le rendement d'environ 30% par rapport à la moyenne des 17 simulations obtenues en appliquant le modèle sur chaque station. Ce biais est d'autant plus important lorsque la pluie annuelle est comprise entre 450 et 600 mm/an, ce qui correspond à une année moyenne ni trop sèche ni trop humide (Fig.4.11).

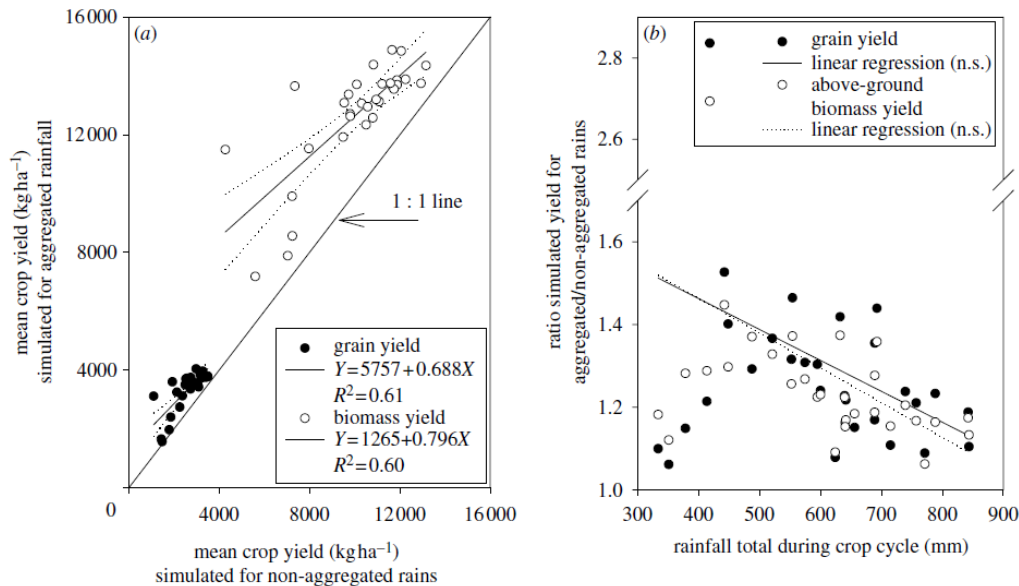


Figure 4.11 : (a) Relation entre le rendement annuel (ronds noirs) et la biomasse (ronds blancs) du mil simulés avec les pluies agrégées (axe vertical) et les stations individuelles (axe horizontal). Les droites de régression et les intervalles de confiance à 95% ont été calculés avec Sigma Plot v.9. (b) Relation entre le biais induit par l'agrégation sur la simulation du rendement et de la biomasse et la pluie cumulée sur le cycle de développement de la plante. Tiré de Baron et al. (2005).

En effet, cette étude a montré que les pluies moyennes sur une maille de 200 km de côté présentent une surestimation du nombre d'événements pluvieux, et une sous-estimation de leur intensité par rapport à une séquence effectivement mesurée en une station pluviométrique à l'intérieur de cette maille. En effet, pour un jour donné s'il pleut 100 mm sur 10% de la maille et 0 mm sur le reste, la pluie moyenne sera de 10mm sur la maille. Cette modification dans le régime pluviométrique favorise la plante car elle réduit les pertes d'eau due au ruissellement et à l'infiltration en profondeur.

Il apparaît donc fondamentalement inapproprié de forcer directement un modèle agronomique avec des sorties de MCG: comme beaucoup de modèles environnementaux ou de modèles d'impacts, les modèles de cultures sont spécifiques d'une échelle donnée – l'échelle parcellaire – et nécessitent des données d'entrée à cette échelle (Heuvelink 1998). Il est donc nécessaire de retrouver une information locale utilisable par les modèles agronomiques à partir de l'information plus grande échelle des modèles de climat. Pour réaliser ce transfert d'échelle, on utilise des méthodes généralement connues sous le nom de méthodes de désagrégation (« downscaling » en anglais). Il s'agit de combiner l'information du climat à grande échelle avec des spécificités régionales ou locales (typiquement la topographie, la répartition des terres/océans, l'utilisation du sol, etc. ...) pour retrouver le climat local (Von Storch 1995). Les méthodes de désagrégation se répartissent en trois catégories :

- (i) Les méthodes dynamiques utilisant des modèles à méso-échelle simulant le climat local d'une région déterminée à résolution fine (20-50km) en prenant en compte les spécificités régionales comme le modèle MAR développé pour l'Afrique de l'Ouest par Gallée et al. (2004).
- (ii) Les méthodes statistiques basées sur des relations empiriques entre la circulation atmosphérique à grande échelle et le climat local (Zorita et Von Storch 1999). Parmi ces méthodes, on compte les générateurs de temps (Wilks et Wilby 1999) qui sont des modèles stochastiques générant des séries virtuelles avec les mêmes propriétés que les séries observées, les méthodes de type régression linéaire (analyse canonique, régression multiple) ou non-linéaire (réseau de neurones) et les méthodes en type de temps (classification automatique, analogues).
- (iii) Les méthodes statistico-dynamiques combinant les méthodes empiriques et dynamiques (Zorita et Von Storch 1999).

Une revue de ces différentes méthodes et de leurs applications a été réalisée par Zorita et Von Storch (1999) et plus récemment en langue française par Herrera et al. (2007). Le principe général consiste alors, à l'aide d'une de ces méthodes que l'on calibre pour la région d'étude, à retrouver à partir de la séquence climatique fournie par le MCG, un certain nombre de séquences locales « virtuelles » pouvant ensuite servir à forcer un modèle de culture: on obtient ainsi des rendements sur des parcelles « virtuelles » au sein de la maille, rendements dont la distribution est similaire à celle des rendements qui seraient réellement observés. Le choix d'une méthode plutôt qu'une autre est conditionné par les spécificités de la zone d'étude, chaque méthode présentant des avantages et des inconvénients. Les méthodes dynamiques, sur lesquelles je reviendrai plus en détail dans la suite, sont coûteuses en temps de calcul et reproduisent, voire amplifient, souvent les biais des MCG mais elles peuvent s'avérer très pertinentes dans le contexte du changement climatique puisque les modèles régionaux simulent toute la complexité du climat local. Les méthodes statistiques sont très simples à mettre en place, peu coûteuses en termes de temps et peuvent également corriger efficacement les biais des MCG. En revanche, elles nécessitent d'avoir à disposition des jeux de données longs et fiables à l'échelle locale et font une hypothèse forte de stationnarité (les relations entre la grande échelle et l'échelle locale sont invariables dans le temps) qui peut être mise à défaut si le climat change.

La nécessité de l'agrégation

L'étude des impacts de la variabilité climatique sur les cultures ne peut néanmoins s'arrêter à cette échelle parcellaire: il est nécessaire d'agréger les sorties à une échelle supérieure à la parcelle, et cela pour deux raisons. La première est que l'échelle d'intérêt pour prévoir ou analyser les impacts du climat est souvent supérieure à celle de la parcelle: par exemple l'échelle régionale. C'est à cette échelle qu'il faut délivrer une information sur l'impact agronomique. Si de plus on a procédé à la désagrégation d'une sortie de MCG pour simuler des parcelles « virtuelles », cette réagrégation est d'autant plus nécessaire qu'une information sur de telles parcelles prises isolément n'a pas de sens réel. La seconde raison, dont j'ai déjà parlé en section 4.2.2 est que l'échelle de la parcelle fait l'objet d'une variabilité qui peut échapper au modèle agronomique: en milieu paysan, le rendement annuel sur une parcelle peut dépendre en grande partie de facteurs environnementaux (fertilité, type de sol, mauvaises herbes, parasites..) et socio-économiques (main d'œuvre, statut foncier, prix d'achat..). Ces facteurs ne sont pas pris en compte par le modèle, qui simule en fait un rendement « potentiel»: le rendement maximum qui peut être obtenu en milieu paysan sous contrainte climatique. A l'échelle parcellaire en milieu non contrôlé, il est donc possible que le modèle

capture mal la variabilité du rendement. En revanche cette variabilité non climatique a tendance à disparaître lorsqu'on moyenne les observations à une échelle plus élevée, qui lisse la variabilité entre parcelles et amplifie le signal climatique (par exemple la corrélation entre le cumul pluviométrique et le rendement). C'est donc à ce type d'échelle (village, district, région) qu'il convient d'agréger les sorties du modèle de culture, parce que c'est là qu'il pourra donner les meilleures prédictions. Challinor et al. (2003) décrivent la recherche d'une telle échelle dans le cas du rendement de l'arachide en Inde.

L'agrégation (« upscaling » en anglais) se heurte néanmoins à une difficulté importante: la prise en compte de l'hétérogénéité des paramètres d'entrée du modèle à grande échelle. En effet, les modèles de culture font l'hypothèse d'un « environnement » (combinaison des paramètres du modèle) homogène à l'échelle de la parcelle. Or, types de sols et itinéraires techniques (variétés cultivées, dates/densités de semis, intrants, etc...) peuvent varier fortement au sein d'une même région. Il faut d'une façon ou d'une autre rendre compte de cette hétérogénéité. On ne peut, du fait de la non-linéarité de la réponse du modèle agronomique aux variations de ces paramètres, se contenter de simulations avec un set unique de paramètres « représentatifs »: ici encore, la simulation de la moyenne n'est pas la moyenne des simulations, comme l'illustrent Hansen et Jones (2000) à travers la réponse d'un modèle de culture à la densité de semis. Qui plus est, il est aussi démontré qu'utiliser un, ou même plusieurs, points représentatifs pour estimer un rendement à plus grande échelle résulte très souvent en une surestimation de la variabilité interannuelle. (Hansen et Jones 2000). Selon que l'on dispose d'une description géographique ou probabiliste des paramètres d'entrée du modèle sur la zone souhaitée, il existe des méthodes utilisant des Systèmes d'Information Géographique (SIG) ou de la théorie de l'échantillonnage (méthodes « Monte-Carlo » par exemple) pour agréger de manière adéquate les sorties des modèles agronomiques (Hansen et Jones 2000).

Enfin, une approche alternative à ces transferts d'échelles, que j'ai adoptée notamment dans le cadre de la thèse d'Alexis Berg, consiste à développer un modèle agronomique directement à l'échelle d'un modèle de climat (Berg et al. 2010a; Izumi et al. 2009; Challinor et al. 2004) : un tel modèle utilise alors directement l'information délivré par le MCG, et fournit par conséquent une information sur la production agricole directement à grande échelle. Une telle approche vise à combiner les avantages d'une approche empirique (faible nombre de paramètres, validité à grande échelle et non spécifique d'un site) et celle d'une approche mécaniste (basée sur les processus, donc pouvant être appliquée dans des conditions environnementales et climatiques différentes). La finalité de tels modèles est d'être moins complexes et avec moins de paramètres que des modèles agronomiques classiques, tout en conservant un formalisme mécaniste. Cette approche, développée notamment dans le cadre des schémas de surface des modèles de « Système Terre » (Scholze et al. 2005), nécessite néanmoins de pouvoir décrire certains processus, déterminants pour le rendement des cultures, à la fois à grande échelle et de façon mécaniste.

4.3.2 Sensibilité au forçage et biais des modèles de climat

Si les MCG reproduisent assez bien les grandes caractéristiques de la circulation atmosphérique à l'échelle globale, leurs performances sont bien moindres à des échelles spatiales régionales ou locales. Ces contre-performances sont en partie liées à une mauvaise paramétrisation des processus sous-maille, non résolus explicitement par la physique des modèles, comme les précipitations, l'infiltration, le ruissellement et les nuages. Or ce sont ces processus qui ont le plus grand impact écologique et sociétal car ils affectent le climat local à

l'échelle de l'activité humaine (Zorita et Von Storch 1999). La figure 4.12 tirée de l'article de Cook et Vizy (2006) illustre les biais des MCG dans leur représentation de la climatologie des précipitations africaines. Chaque modèle donne sa propre image de la mousson africaine et il ne va pas sans dire que ces biais dans leur représentation du climat vont affecter fortement la réponse en termes de rendements agronomiques.

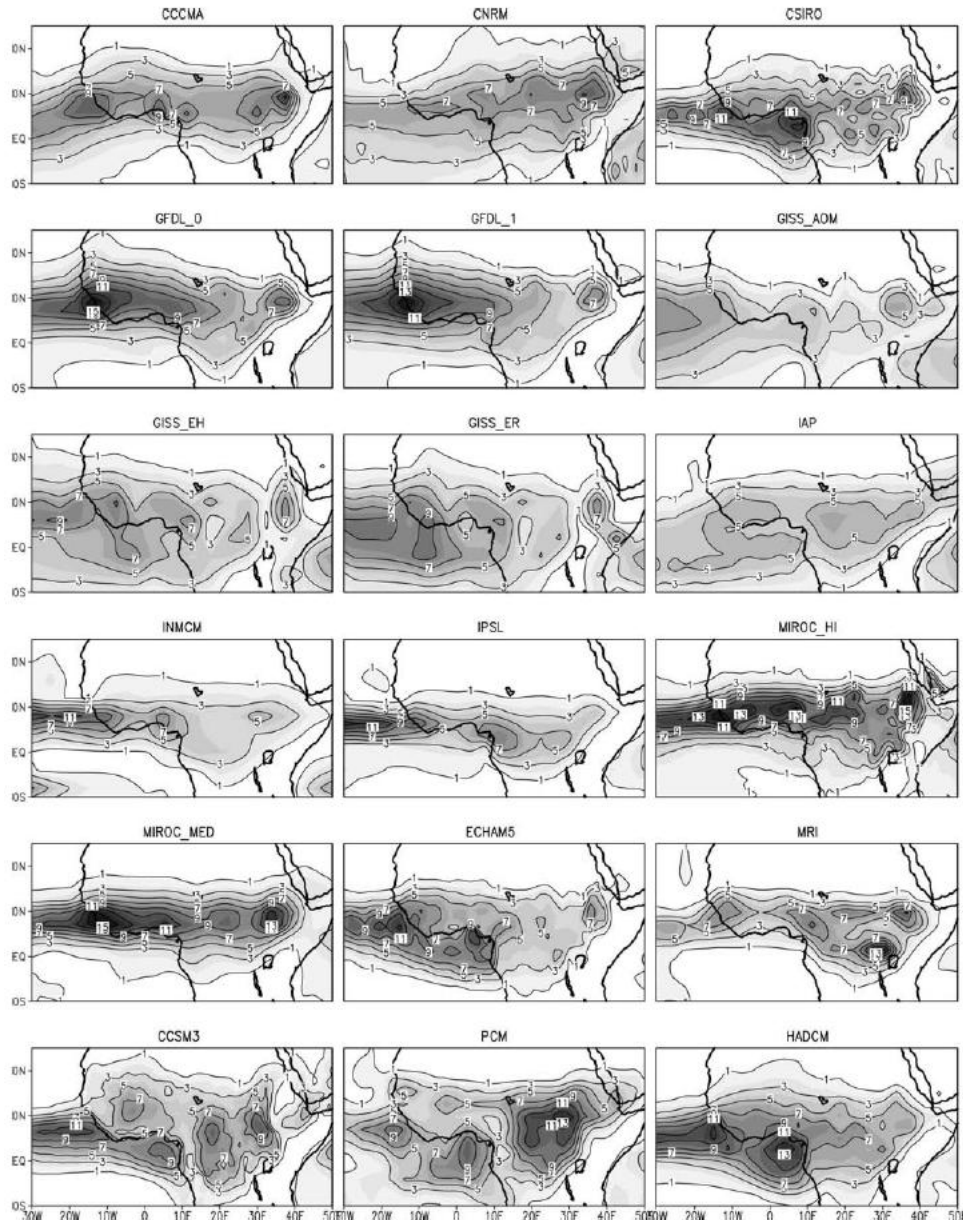


Figure 4.12 : Précipitations estivales (de Juin à Septembre) en moyenne sur la période 1949-2000 (mm/jour) dans plusieurs MCGs couplés. Tiré de Cook et Vizy (2006).

Dans le cadre du séjour postdoctoral de Pascal Oettli au LOCEAN, j'ai pu montrer, en collaboration avec Christian Baron, comment les biais des modèles de climat affectent la simulation agronomique (Oettli et al. 2011). Pour ce faire on a utilisé un set de 9 modèles régionaux forcés par les réanalyses ERA-I sur la période 1990-2000 issus du projet ENSEMBLES. On a forcé le modèle agronomique SARRAH avec ces simulations régionales pour simuler le rendement du sorgho au Sénégal et on a comparé les résultats avec une même simulation du modèle SARRAH mais forcé par les observations météorologiques locales issues de la DMN et de l'AGRHYMET. Alors que ces simulations devraient être parmi les

plus pertinentes pour les études d'impacts compte-tenu de la résolution fine des modèles régionaux et du fait qu'elles soient forcées par les réanalyses ERA-I, la figure 4.13 montre que les rendements simulés par les modèles sont extrêmement dispersés selon la configuration régionale et parfois très éloignés des rendements simulés par les observations. En moyenne sur la période 1990-2000, les rendements simulés peuvent varier de près de 0 kg/ha à 600 kg/ha selon le modèle régional considéré. Pire, pour un même modèle régional mais utilisé avec des paramètres différents (le modèle HIRAM avec la configuration du DMI et du METNO), les rendements diffèrent fortement.

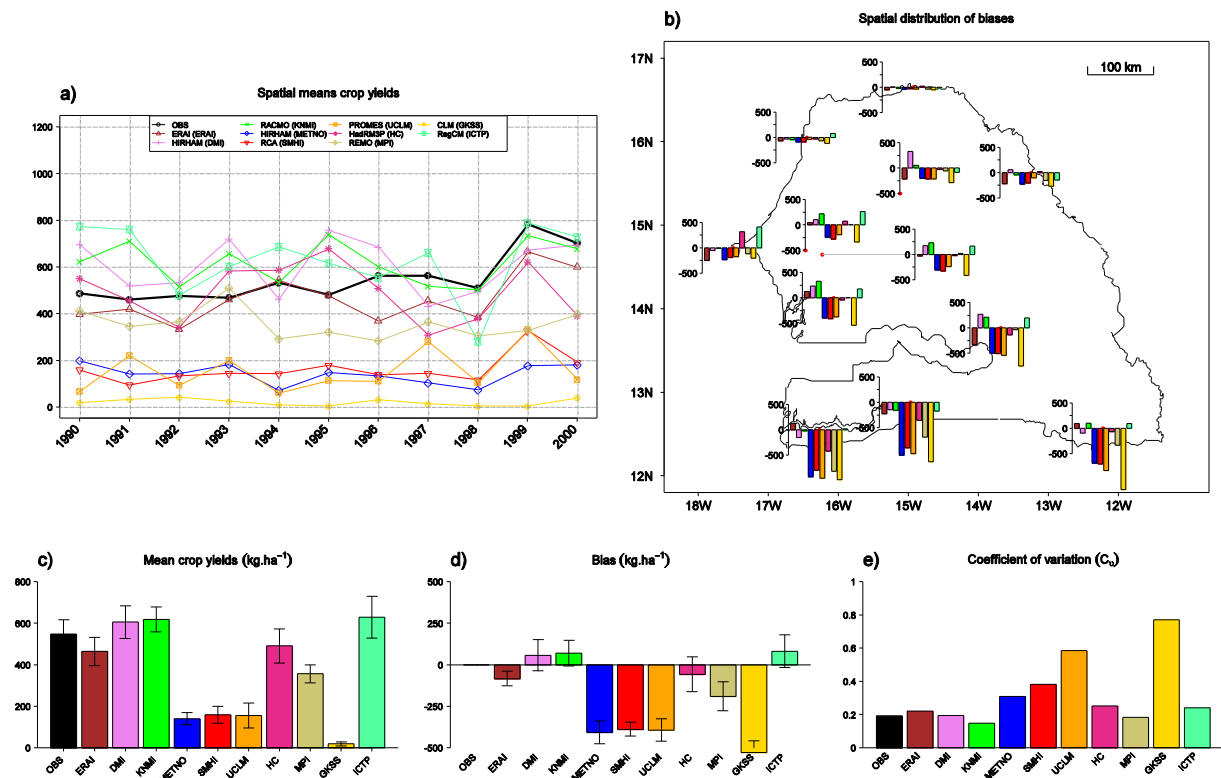


Figure 4.13 : (a) Moyenne spatiale sur tout le Sénégal du rendement du sorgho avec les observations (courbe noire) et les 9 modèles régionaux ainsi qu'avec ERA-I seul (couleurs). (b) Biais moyen des simulations de rendement pour les 12 stations météorologiques considérés sur le Sénégal. Rendement simulé moyen (c), biais moyen (d) et coefficient de variation du rendement sur le Sénégal sur la période 1990-2000. Tiré de Oettli et al. (2011).

Une analyse détaillée sur la raison de ces forts biais dans les simulations de rendement utilisant les sorties de modèles régionaux nous a permis de montrer que la mauvaise représentation de la pluie mais également du rayonnement global (Fig.4.14), important pour le bilan carboné et la production de biomasse, sont à l'origine des contre-performances de la plupart des modèles régionaux (Oettli et al. 2011).

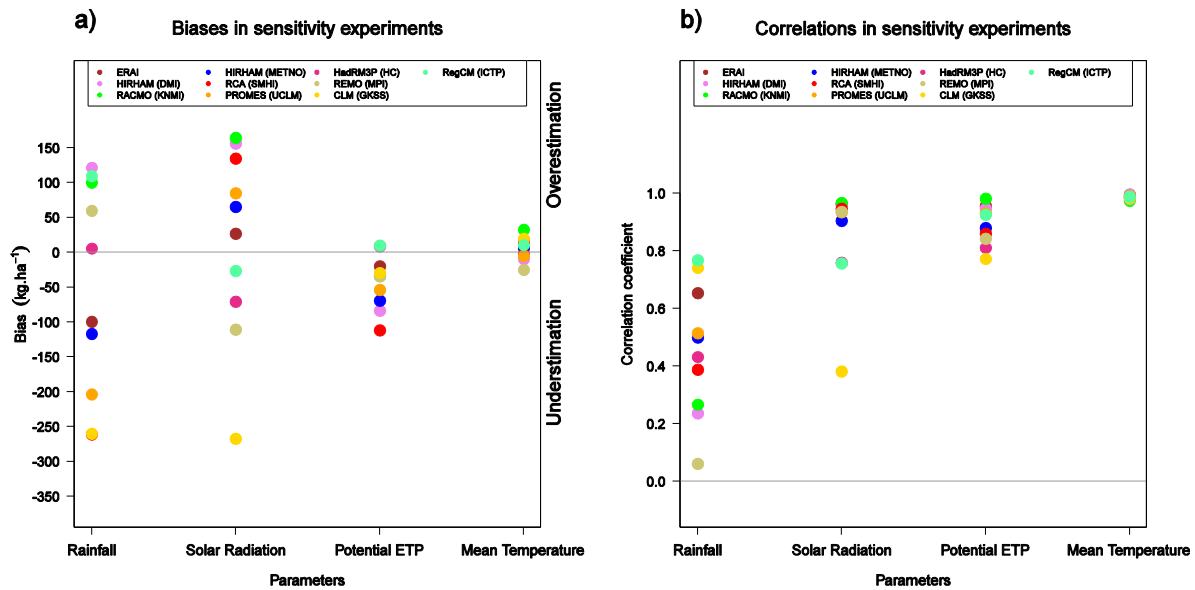


Figure 4.14 : Part marginale de différentes variables climatiques (pluie, rayonnement solaire, évapotranspiration potentielle et température) sur le biais moyen (a) et le coefficient de corrélation (b) avec la simulation de référence du rendement sur le Sénégal sur la période 1990-2000. Tiré de Oettli et al. (2011).

Compte-tenu de ces biais des modèles de climat et de la sensibilité des modèles agronomiques à ces biais, il est particulièrement important d'appliquer des méthodes de correction de biais aux sorties des modèles de climat avant leur utilisation pour prédire les rendements. Plusieurs méthodes de correction de biais ont été développées et sont appliquées avec succès dans la littérature. Par exemple la méthode la plus simple et la plus utilisée dans le contexte du changement climatique est la méthode des deltas (Hay et al. 2000). Elle consiste à comparer les sorties des MCG pour la période de référence et la période future, puis à calculer un écart mensuel moyen pour chaque variable météorologique nécessaire pour forcer le modèle agronomique. Ces écarts sont ensuite appliqués à la séquence météorologique utilisée dans le modèle agronomique pour la période de référence. Cette méthode, souvent utilisée en première approximation présente néanmoins de grandes imprécisions liées à l'état moyen du modèle (plus l'état moyen du modèle est mauvais, moins la correction a de sens) et surtout de ne prendre en compte qu'un changement moyen (dans l'espace et le temps), la fréquence des précipitations et les événements extrêmes restant inchangés. Des méthodes plus complexes basées sur la correction de la distribution des variables météorologiques sont plus appropriées mais si elles requièrent de longues séries de données de qualité pour être calibrées (Ines and Hansen 2006 ; Déqué 2007 ; Michelangeli et al. 2009). Toujours avec Pascal Oettli et en collaboration avec Mathieu Vrac, j'ai calibré et appliqué la méthode de correction de biais de Michelangeli et al. (2009) aux sorties des 9 modèles régionaux décrits précédemment pour voir dans quelle mesure on pouvait améliorer les simulations de rendement. Cette méthode est basée sur une transformation statistique appliquée à la distribution en fréquences cumulées de chaque variable météorologique (Michelangeli et al. 2009). La figure 4.15 est identique à la figure 4.13 mais cette fois le biais des modèles régionaux a été atténué de sorte que les rendements simulés sont beaucoup plus proches de ceux obtenus à partir des sorties brutes des modèles régionaux (Oettli et al. 2011).

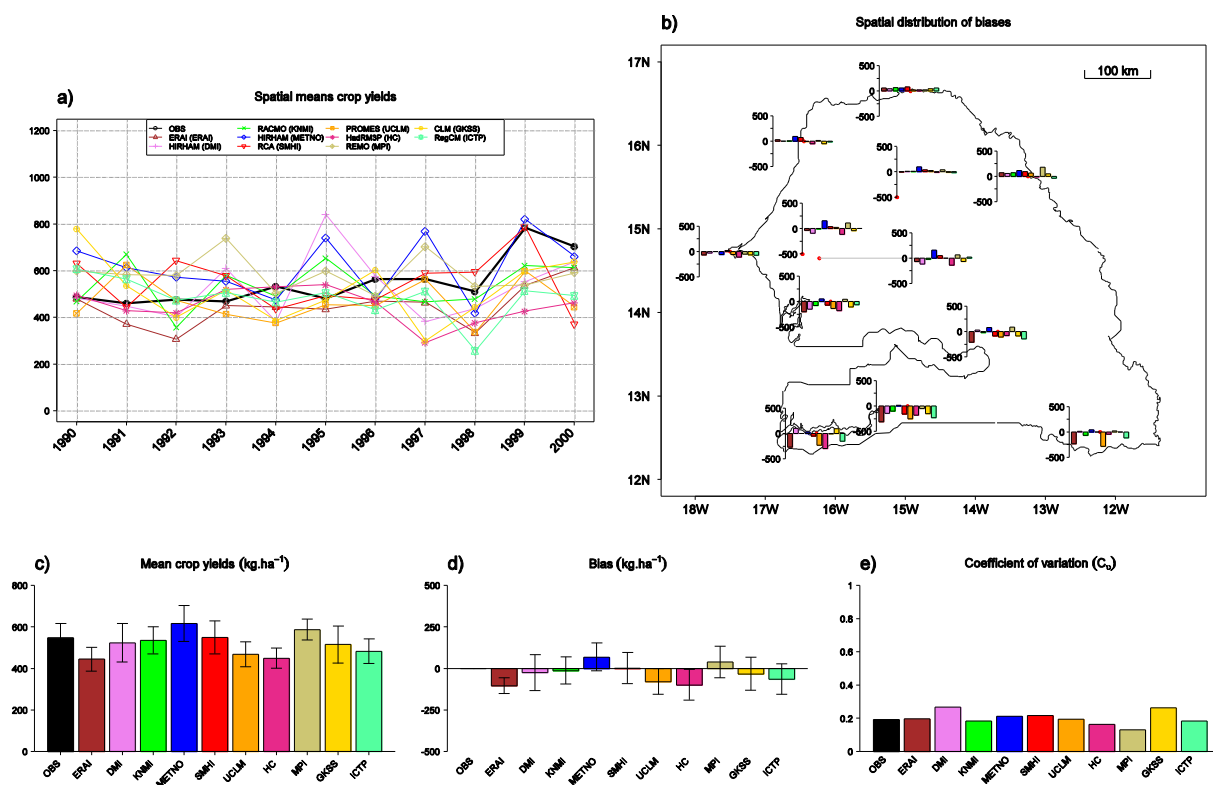


Figure 4.15 : Idem Fig.4.13 mais après l'application d'une méthode de correction de biais aux sorties modèles régionaux. Tiré de Oettli et al. (2011).

Néanmoins cette méthode de correction de biais, comme la plupart des autres méthodes, ne corrige que le biais moyen et la fréquence journalière et ne corrige pas les erreurs sur la variabilité d'une année sur l'autre.

4.3.3 Perspectives

Parmi les perspectives à cet axe de travail, je souhaiterais poursuivre plus avant l'analyse des biais des modèles de climats (MCG et modèles régionaux) pour leur utilisation dans le cadre d'études d'impacts. En particulier, pouvoir identifier quelles sont les échelles (saisonniers, intra-saisonniers, synoptiques) et les variables clés pour la simulation des impacts me semble un message important à apporter à la communauté des modélisateurs du climat. Il me paraît également très pertinent d'élaborer une métrique basée sur les impacts agronomiques pour l'évaluation des modèles du climat existants et à venir. Enfin, je souhaiterais également m'investir dans l'utilisation d'un modèle de climat (le modèle LMDZ ou bien le modèle régional WRF) pour, sinon mieux comprendre le pourquoi des biais des modèles à travers des études de sensibilité, ou à défaut réaliser un ensemble de simulations du modèle de climat pour trouver les ingrédients optimaux (résolution, correction de biais, paramétrisation) pour une meilleure prédiction des impacts agronomiques. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet international CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment) qui rassemble la communauté scientifique internationale autour de l'amélioration des simulations à haute résolution du climat sur l'ensemble du globe dédiées pour les impacts et l'adaptation au changement climatique. Je souhaiterais y contribuer en apportant des métriques d'évaluation orientées vers les impacts agronomiques du climat.

4.4 Le changement climatique et ses conséquences sur l'agriculture

Comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, le secteur agricole de l'Afrique sub-saharienne est extrêmement vulnérable à la variabilité et aux changements climatiques. De fait, il est d'un enjeu crucial de pouvoir réaliser des projections fiables du devenir de la production agricole en Afrique sub-saharienne en réponse aux changements du climat. Cependant cette tâche reste encore difficile à réaliser compte-tenu des fortes incertitudes sur les projections régionales du changement climatique, dans la réponse des plantes aux changements environnementaux (pluie, températures, concentration de CO_2 dans l'atmosphère), dans le couplage des modèles agronomiques et climatiques et dans la façon dont les systèmes agricoles vont s'adapter progressivement aux changements environnementaux (Challinor et al. 2007). C'est de toute cette cascade d'incertitudes, où les erreurs s'additionnent plutôt que ne se compensent, que résultent les projections actuellement très divergentes sur le futur de la productivité agricole en Afrique sub-saharienne et les estimations très qualitatives, voire erronées, du dernier rapport du WG2 du GIEC AR4. A travers l'« Africagate », la presse n'a d'ailleurs pas manqué de discréditer le travail du WG2, à juste titre, lorsque le rapport fait mention dans le résumé pour les décideurs que le rendement de l'agriculture pluviale va diminuer par deux d'ici 2020 en Afrique ; affirmation basée que sur les résultats d'une seule étude concernant seulement trois pays d'Afrique du Nord et pourtant largement reprise comme un leitmotiv par les scientifiques et les politiques pour justifier la lutte contre les effets du changement climatique en Afrique sub-saharienne. Mon objectif a donc été (i) de contribuer à quantifier et à hiérarchiser les incertitudes dans les effets de climat sur les projections du rendement futur en Afrique et (ii) de combiner les ensembles de projections climatiques du dernier rapport AR4 du GIEC avec les modèles agronomiques SARRAH et ORCHIDEE-Mil selon différents protocoles pour produire des projections originales du futur de la productivité en Afrique.

4.4.1 Le futur des rendements en Afrique de l'Ouest sous l'effet du changement climatique : que dit la littérature ?

Il existe de nombreux articles et rapports faisant état de projections futures des rendements en Afrique sub-saharienne en réponse aux changements environnementaux (Challinor et al. 2007). Cependant elles portent toutes sur un pays ou un groupe de pays en particulier, mettant l'accent sur une culture ou sur une variété spécifique, et utilisent des méthodologies différentes (modèle empirique ou mécaniste pour simuler les rendements, différentes méthodes de régionalisation, différents modèles ou scénarios climatiques, prise en compte de l'effet du CO_2). Il est donc assez difficile de se faire une idée d'ensemble de l'impact du changement climatique sur l'agriculture en Afrique et surtout des incertitudes dont sont assorties ces projections. Dans le cadre de la thèse de Philippe Roudier, on a procédé à une méta-analyse des résultats de la littérature en compilant les résultats issus de 16 publications récentes sur le sujet (Roudier et al. 2011b). On a alors constitué une base de données constituée de 347 valeurs prédites de rendement pour le futur sur la base de laquelle a pu être documentée plus précisément l'incertitude de ces projections. La figure 4.16a montre que le signe du changement relatif de rendements entre le présent et le futur est dans la plupart des cas négatif avec une baisse des rendements de l'ordre de 10% par rapport au présent. Ce chiffre est néanmoins assorti d'une incertitude forte puisque les distributions des réponses sont très étalées variant de -40% à +80% selon les cas. La prise en compte de la concentration atmosphérique en CO_2 , qui a un effet fertilisant sur la plante quoiqu'encore mal compris et mal représenté par les modèles (Long et al. 2006 ; Tubiello et al. 2007 ; Ainsworth et al. 2008), a un effet d'atténuation sur l'effet négatif du changement climatique bien que les

impacts combinés des changements environnementaux (climat et) restent globalement négatifs.

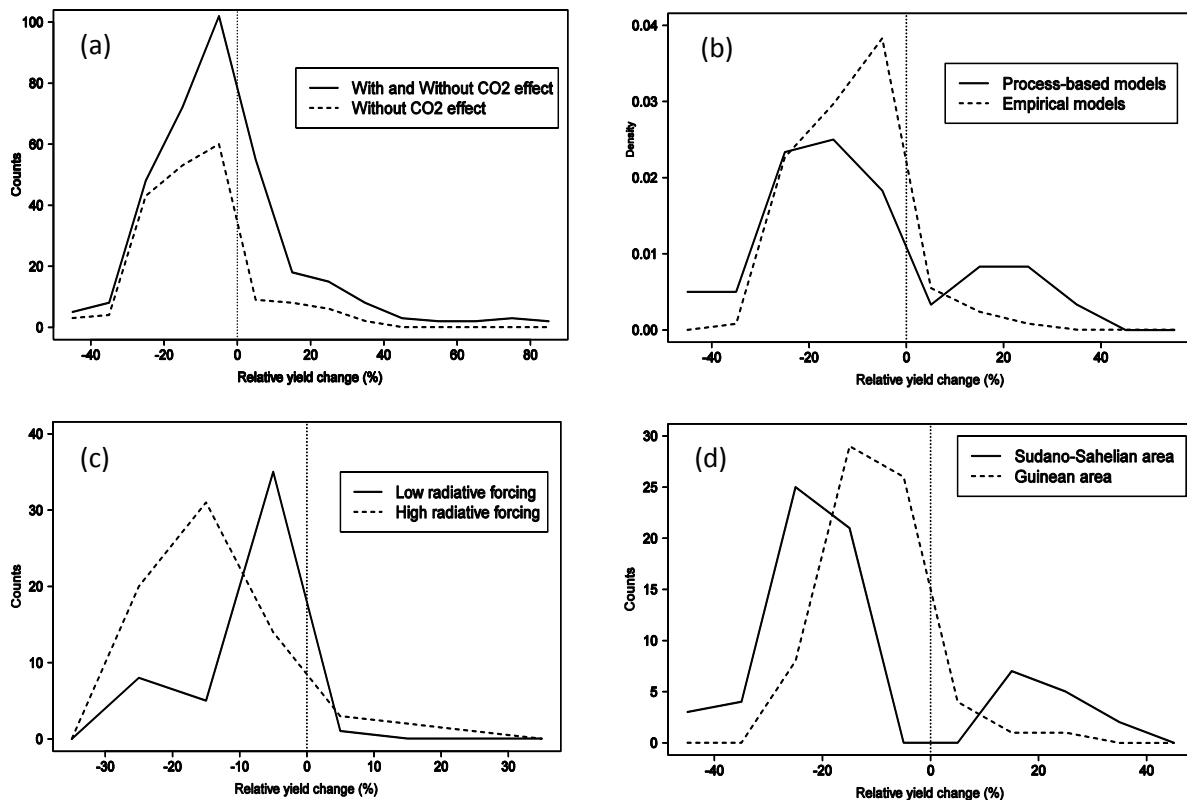


Figure 4.16 : (a) Distribution des changements relatifs de rendement en Afrique de l’Ouest entre le présent et le futur pour 16 études récemment publiées (trait continu). La courbe discontinue représente la même distribution mais uniquement pour les études ne considérant pas l’effet du CO2 sur la plante. (b) Comme (a) mais en distinguant les résultats basés sur des modèles mécanistes (trait continu) de ceux basés sur les modèles empiriques (trait discontinu). (c) Comme (a) mais en distinguant les résultats selon que le forçage radiatif est faible (trait continu) ou faible (trait discontinu). (d) Comme (a) mais en les résultats sur les pays soudano-sahéliens (trait continu) de ceux sur les pays guinéens (trait discontinu). Tiré de Roudier et al. (2011b).

Il est également intéressant de constater que même si la dispersion des résultats issus de l’utilisation de modèles mécanistes est plus forte (ce qui est logique car ces modèles sont moins contraints que les modèles statistiques), le signe du changement de rendement qu’ils prévoient est le même que pour les modèles empiriques (Fig.4.16b). L’amplitude des impacts du changement climatique sur les rendements semble modulée par l’intensité du forçage radiatif. Autrement dit, plus la concentration de dans l’atmosphère considérée dans ces études est élevée (horizons temporels lointains, scénarios économiques avec de fortes émissions comme A2), plus l’impact négatif attendu sur les rendements est fort (Fig.4.16c). Cette constatation donne un sens particulièrement important à la prise en compte de la réduction des émissions de par les mesures d’atténuation qui peuvent limiter les impacts sur l’agriculture en Afrique de l’Ouest. Enfin, la figure 16d montre un impact différentiel du changement climatique selon la région de l’Afrique de l’Ouest ; les pays sahéliens étant plus durement touchés que les pays guinéens.

On peut maintenant s’intéresser aux variables climatiques responsables cet impact négatif dans les études existantes et en particulier au rôle respectif des températures et des précipitations. Les changements de températures et de précipitations sont tous les deux des déterminants majeurs dans les tendances récentes observées sur la production agricole en

Afrique sub-saharienne. A la fois l'augmentation des températures mais surtout la diminution des précipitations ont conduit à des déficits de production depuis les années 70 (Barros et al. 2008). Si les effets des précipitations ont été dominants dans l'histoire récente comme je l'ai montré en introduction de ce chapitre à travers l'exemple de la relation forte entre pluviométrie et productivité du mil au Niger, il peut en être tout à fait différent dans le futur. En effet, Schlenker and Lobell (2010), l'une des 16 études que l'on a considérée dans notre méta-analyse, montre que l'augmentation de température prévue par les modèles est bien plus forte que celle des précipitations qui est généralement plus petite que l'écart-type historique. De plus les auteurs montrent à partir d'une modélisation empirique de la relation climat-rendement que l'impact marginal du changement d'un écart-type des pluies est inférieur à celui d'un changement d'un écart-type des températures dans le futur.

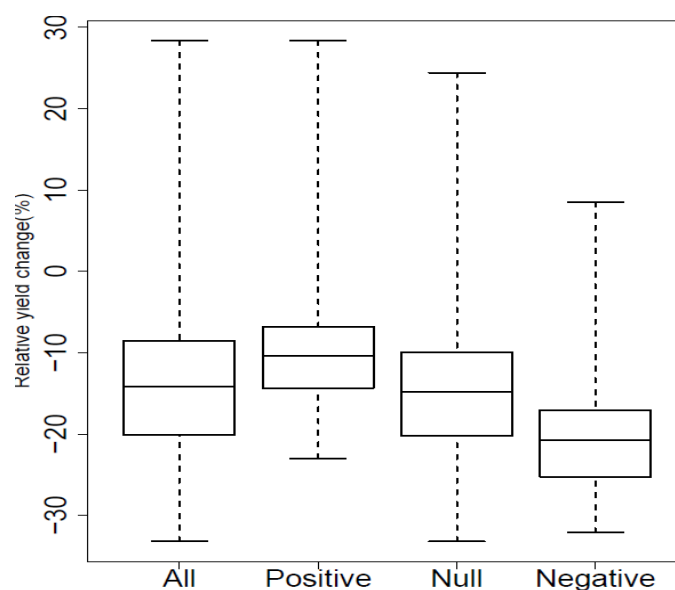


Figure 4.17 : Impact des précipitations sur le rendement simulé en Afrique (%). Les valeurs sont basées sur l'étude de Schlenker et Lobell (2010). « All » considère la distribution des changements de rendement pour toute l'étude. « Positive » montre l'évolution future des rendements dans les cas où les pluies augmentent ($\geq 5\%$), « Null » montre l'évolution future des rendements dans les cas où les pluies stagnent (-5% ; $+5\%$) et « Negative » montre l'évolution future des rendements dans les cas où les pluies diminuent ($\leq -5\%$). Les boîtes à moustaches (boxplots) ont été réalisées avec le logiciel R v.2.8. Tiré de Roudier et al. (2011b).

En se basant sur les résultats de Schlenker and Lobell (2010), la figure 4.17 illustre cet effet marginal des pluies et des températures sur le changement futur du rendement en Afrique. Même si les pluies ne changent pas dans le futur, le rendement diminue d'environ 15% du fait de l'augmentation des températures qui réduisent la longueur des cycles de culture et augmente le stress hydrique à travers une évaporation accrue. D'après leur étude, les changements de précipitations ont quand même un impact mais moindre comparé à celui des températures. La figure 4.17 montre que selon que la pluie augmente ou diminue dans le futur, l'impact sur le rendement est amplifié d'un facteur deux – respectivement -10% et -21% si l'on considère le changement médian. Ce résultat est cohérent avec celui de Salack (2006) qui montre que pour une variété de mil, une augmentation des précipitations ne peut compenser les impacts négatifs d'une augmentation des effets d'une augmentation de températures ($+1.5^{\circ}\text{C}$) même si elle en atténue l'amplitude. Cependant séparer les effets des précipitations et des températures dans le futur reste difficile car les deux variables sont fortement liées (Douvillle 2008). L'incertitude sur le devenir des précipitations en Afrique de l'Ouest est également un facteur très limitant pour affiner les projections futures de rendement

en réponse aux changements environnementaux. En effet, il n'y a pas de consensus entre les modèles de climat quand à l'impact du réchauffement climatique sur les pluies au Sahel (Cook and Vizzy 2006; Druyan 2010), certains modèles faisant état d'une possible aridification, d'autres d'une augmentation des pluies dans le futur. Seules quelques études récentes (Biasutti and Sobel 2009; Patricola and Cook 2010) ont trouvé un signal robuste entre les différents modèles du GIEC CMIP3 qui atteste d'un décalage de la saison de mousson (un assèchement en début de saison et une augmentation des pluies à la fin de la saison). Il est donc clair que réduire les incertitudes sur le devenir des précipitations au Sahel dans le contexte du changement climatique sera crucial pour affiner les prédictions futures de rendement en Afrique de l'Ouest. Cependant, comme je l'ai montré à travers l'analyse détaillée des résultats de la littérature et comme je vais maintenant le présenter à travers les résultats que j'ai obtenus, il semble que le signal robuste de baisse des rendements du au réchauffement, qui lui est cohérent dans tous les modèles du GIEC AR4, ne pourra être modulé que marginalement par l'effet des précipitations.

4.4.2 Projections futurs du mil en Afrique de l'Ouest

Pour construire des projections futures du mil en Afrique de l'Ouest à partir des scénarios de changement climatique issus des modèles du GIEC AR4, je me suis focalisé sur deux approches distinctes. La première consiste à utiliser directement les sorties des modèles de climat pour forcer un modèle de croissance de plante sans appliquer de corrections pour changer l'échelle ni réduire les biais des modèles ; ce type de corrections pouvant apporter elles-mêmes des erreurs et incertitudes comme je l'ai montré en section 4.3. Pour cette approche on utilisera le modèle ORCHIDEE-Mil développé au cours de la thèse d'Alexis Berg qui peut être utilisé directement à grande échelle (voir section 4.2.2). La deuxième approche, plus classique, consiste à appliquer la méthode des deltas à des séries météorologiques observées (voir section 4.3.2) pour introduire un changement dans les précipitations et/ou dans les températures et à utiliser ces séries modifiées comme entrées pour le modèle SARRAH (voir section 4.2.2).

Les impacts du changement climatique sur les rendements à la grande-échelle

Dans le cadre de la thèse d'Alexis Berg, le modèle ORCHIDEE-Mil a été forcé par les sorties d'un sous-ensemble des modèles du GIEC AR4 (Berg et al. 2011). Des simulations transitoires ont été réalisées sur la période 1961-2000 (8 modèles) et sur le 21^{ème} siècle avec les scénarios A1B (7 modèles) et A2 (5 modèles). Le choix et le nombre de modèles s'est fait sur la base de la disponibilité des variables climatiques nécessaires pour forcer ORCHIDEE-Mil dans l'archive du PCMDI. Les simulations ont été réalisées avec et sans augmentation de la concentration du CO_2 dans l'atmosphère de sorte que l'on a pu quantifier l'effet de fertilisation du CO_2 sur les changements futurs des rendements. Le modèle ayant montré une bonne qualité de prédiction des rendements du mil en Afrique et en Inde (voir section 4.2.2), les simulations ont été réalisées sur une fenêtre spatiale englobant l'Afrique et le subcontinent indien. Du fait des biais importants des modèles de climat, en particulier dans la distribution spatiale des précipitations en Afrique comme je l'ai montré dans la section 4.3, il est difficile de conduire une analyse des impacts sur une base géographique. Par exemple, s'il ne pleut pas suffisamment au Sahel comme c'est le cas dans le modèle de l'IPSL notamment (Fig.4.12), le modèle agronomique ne simulera que des très faibles valeurs de rendement, voire un rendement nul, et le changement dans le futur que donnera le modèle agronomique n'aura vraisemblablement que peu de sens. On s'est donc orienté dans l'analyse des rendements simulés au sein de zones climatiques homogènes pour éliminer les incertitudes et les erreurs

liées aux biais géographiques des modèles. Une version simplifiée de la classification de Koppen a été appliquée sur les sorties de chaque modèle de climat pour distinguer quatre zones climatiques homogènes : une zone équatoriale humide toute l'année, une zone équatoriale à saison sèche, une zone aride et une zone tempérée (Fig.4.18). Les pixels de chaque classe diffèrent géographiquement selon les modèles mais partagent globalement les mêmes conditions climatiques.

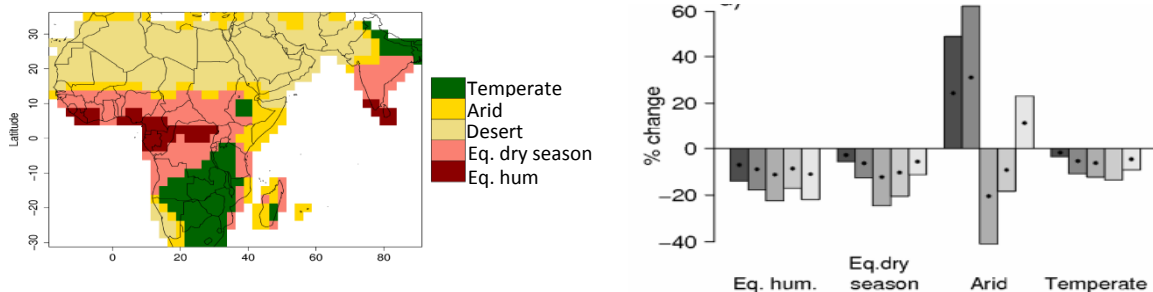


Figure 4.18 : (Gauche) Localisation des zones climatiques de Koppen dans le modèle MIROC-MEDRES sur la période présente 1970-2000. (Droite) Changement relatif en rendement (%) entre le présent (1970-2000) et le futur (2070-2100) selon le scénario A1B pour les 7 modèles du GIEC AR4 considérés. Les points représentent les changements significatifs à 5%. Tiré de Berg et al. (2011).

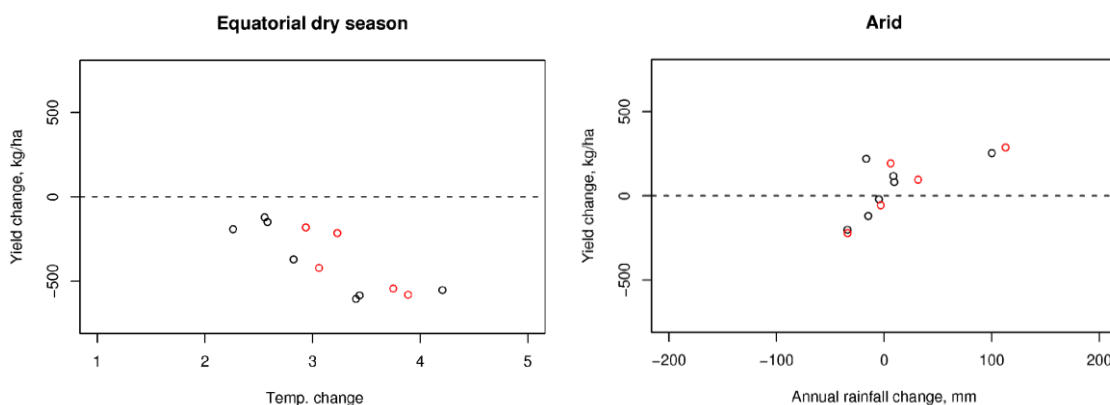


Figure 4.19 : (Gauche) Relations entre les changements futurs de rendement du mil (kg/ha) et de températures (°K) dans la zone équatoriale à saison sèche. (Droite) Relations entre les changements futurs de rendement du mil (kg/ha) et des précipitations (mm) dans la zone aride. Chaque point correspond à la projection d'un des modèles du GIEC AR4 utilisé selon le scénario A2 (points rouges) et A1B (points noirs). Tiré de Berg et al. (2011).

On observe une réponse très cohérente du rendement simulé entre les différents modèles qui s'accordent tous à montrer une baisse des rendements dans trois des quatre grandes régions considérées (zone équatoriale humide, zone équatoriale à saison sèche et une zone tempérée ; Fig.4.18). Ce signal, robuste avec le scénario A2, est largement du à l'augmentation de températures (Fig.4.19 gauche), cohérentes d'un modèle à l'autre, qui réduit la longueur de cycle de la plante. Ce déficit de rendement dans le futur reste le même lorsque l'on considère l'effet du CO_2 sur la plante. Ce dernier est très faible dans le modèle car la photosynthèse du mil en C4 n'est que très peu sensible à l'effet fertilisant du CO_2 contrairement à la photosynthèse en C3 (blé, coton par exemple). Dans les zones arides où le rendement simulé est très sensible aux variations pluviométriques (Fig.4.19 droite), aux franges du désert saharien notamment, la réponse en rendement est beaucoup plus divergente entre les modèles du fait de l'incohérence des modèles climatiques dans leur projection future de la pluviométrie annuelle. Dans ces zones, les modèles dont les précipitations augmentent (diminuent) dans le futur conduisent à des rendements accrus (réduits). Ces résultats confirment le rôle important des températures dans le futur des rendements sur la majeure

partie de l'Afrique bien qu'une incertitude subsiste quant aux changements induits par les précipitations dans les régions les plus sensibles au stress hydrique.

Les impacts du changement climatique sur les rendements à l'échelle fine

Une autre façon d'appréhender les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest a été envisagée avec Philippe Roudier dans le cadre de sa thèse. On a réalisé un ensemble de simulations du modèle SARRAH pour plusieurs variétés de mil et de sorgho sur un set de 35 stations météorologiques couvrant 9 pays en Afrique de l'Ouest sur la période 1981-2000. On a ensuite, selon la méthode des deltas, surimposé de manière incrémentale aux stations météorologiques locales des anomalies de températures allant de -1°C à $+6^{\circ}\text{C}$ selon un pas de 1°C et/ou des anomalies de précipitations relatives allant de -20% à $+20\%$ selon un pas de 10% . Des simulations du modèle SARRAH ont alors été effectuées pour quantifier la réponse en rendement de ces anomalies de températures et/ou de précipitations (Fig.4.20).

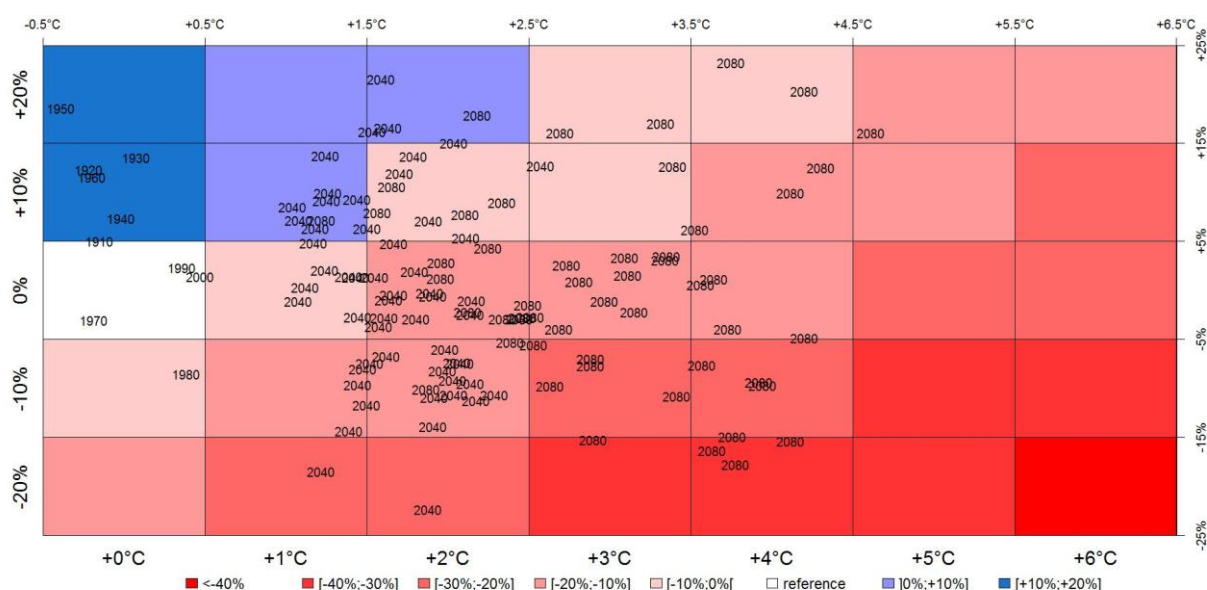


Figure 4.20 : Changement relatif en rendement de plusieurs variétés de mil et de sorgho (%) sous l'effet de variations de températures et/ou de précipitations sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. Les valeurs en rose-rouge indiquent une diminution des rendements tandis que les valeurs en bleu une augmentation des rendements par rapport à la période de référence 1981-2000. Les anomalies au cours des dernières décennies observées par le CRU ont été projetées sur le graphique (décennies allant de 1900 à 2000) ainsi que les anomalies projetées par les 23 modèles du GIEC AR4 et les scénarios A2, A1B et B1 pour les périodes 2030-2050 (2040 sur le graphique) et 2070-2090 (2080 sur le graphique).

On observe que l'impact négatif sur les rendements simulés provoqué par une augmentation de la température de 2°C sur l'Afrique peut être compensé par une hausse de 20% des pluies. En revanche, lorsque le réchauffement dépasse 3°C , on observe un déficit dans le rendement simulé quelle que soit l'anomalie de pluies considérée (dans l'intervalle de variation -20% à $+20\%$ que l'on a considéré comme réaliste en nous basant sur les projections futures minimales et maximales du GIEC sur la région). Lorsqu'on projette maintenant la réponse en température et précipitations de l'ensemble des simulations du GIEC AR4 (tous les modèles et scénarios sont confondus sur le graphique), on observe que ces projections sur la période 2030-2050 correspondent à une gamme de réponse en rendement qui varie entre -10% et $+10\%$ avec une majorité d'impact négatif à nul (entre -10% et 0). En revanche, toutes les projections futures sur la période 2070-2090, quel que soit le modèle et/ou le scénario, correspondent à une gamme de réponse en rendement qui diminue faiblement (entre -10% et

0) à fortement (jusqu'à -40%). Les variations de réponses de rendement dans le futur sont largement dominées par l'effet de la température dont le réchauffement atteint jusqu'à +4°C dans les projections des modèles du GIEC AR4 en Afrique. Ce résultat confirme celui que j'ai exposé précédemment avec le modèle ORCHIDEE-Mil, obtenu avec une méthodologie complètement différente, et ceux obtenus indépendamment dans la littérature (notamment Schlenker et Lobell 2010). Il est intéressant de constater que ces variations en températures et précipitations projetées par les modèles et leur impact sur le rendement sont très différentes de ce que l'on a pu observer au cours du siècle. En effet, la figure 20 montre que les anomalies climatiques passées se distribuent selon un axe vertical dans le graphique (ce sont les anomalies de précipitations qui caractérisent les variations d'une décennie à l'autre) tandis que les projections futures s'étalent largement selon un axe horizontal (ce sont les variations de températures qui discriminent les projections). Les projections des décennies passées et futures et leur réponse en termes de rendement sont ainsi très distinctes dans le graphique, ce qui montre que le changement climatique et ses conséquences, tels qu'ils sont projetés par les modèles du GIEC AR4, va être quelque chose de totalement nouveau, qui ne ressemble en rien à ce que l'Afrique a connu depuis le début du 20^{ème} siècle. Ce résultat souligne ainsi l'ampleur du défi que sera (qu'est) l'adaptation au changement climatique : comment s'adapter à un monde inconnu (et de surcroît incertain)?

4.4.3 Perspectives

La quantification des impacts agronomiques du changement climatique nécessite la mise en place d'une méthodologie souvent complexe avec des outils tirés de l'économie (scénarios d'émission), de la science du climat (modèles et projections climatiques), de l'agronomie (modèles agronomiques) et de la statistique (régionalisation et correction de biais), ayant chacun leurs barres d'erreurs et leurs limites. Le défi à relever ne réside donc pas tant dans l'estimation déterministe et vraisemblablement inatteignable de l'évolution future des rendements mais dans la quantification, la hiérarchisation et la réduction des incertitudes associées aux projections des impacts du changement climatique. Le cadre des nouveaux projets internationaux CORDEX d'inter-comparaison de méthodes de régionalisation et d'AGMIP d'inter-comparaison des modèles agronomiques, dans lesquels je souhaite m'investir dans les prochaines années, marquera très certainement un tournant vers une meilleure prise en compte de cette incertitude à travers des études coordonnées dédiées aux impacts du climat sur l'agriculture qui étaient jusqu'à lors menées de manière très isolée et fragmentée. Cependant, la réduction des incertitudes sur les impacts agronomiques du changement climatique ne se fera pas sans la réduction des incertitudes sur le devenir des pluies dans le futur et donc la nécessaire amélioration des modèles de climat quant à leur représentation des précipitations. Les nouveaux modèles et les nouvelles simulations de CMIP5 pour le 5^{ème} rapport du GIEC, que je souhaite mettre à profit pour réaliser des études d'impacts sur l'Afrique, pourra peut-être permettre des avancées nouvelles sur les projections futures du climat.

4.5 S'adapter aux fluctuations et au changement du climat

L'Afrique sub-saharienne ne peut pas attendre éternellement plus de précisions et de certitudes quant à l'évolution du climat pour définir et appliquer des mesures d'adaptation, le climat d'aujourd'hui ayant déjà un impact très fort sur la production agricole. Pour lutter contre les aléas climatiques, qui sont loin d'être des phénomènes nouveaux en Afrique, les populations rurales ont développé depuis longtemps un grand nombre de pratiques agricoles motivées par une très forte aversion au risque (Affholder 1997; de Rouw 2004). Cependant si ces stratégies sont efficaces pour assurer leur survie, elles limitent fortement le développement en maintenant un potentiel de production faible même quand les conditions pluviométriques sont bonnes et maintiennent de fait les populations rurales dans la pauvreté (CGIAR 2009). La figure 4.21, tirée de Licker et al. (2010) illustre bien l'importance de l'écart de productivité (« yield gap » en anglais) qu'il existe entre le rendement obtenu par les paysans et le rendement potentiellement atteignable. Cet écart, ici calculé pour les cultures du maïs et du riz, montre que le rendement peut être multiplié par un facteur deux ou trois et que le « yield gap » apparaît plus fort en Afrique que partout ailleurs sur le globe.

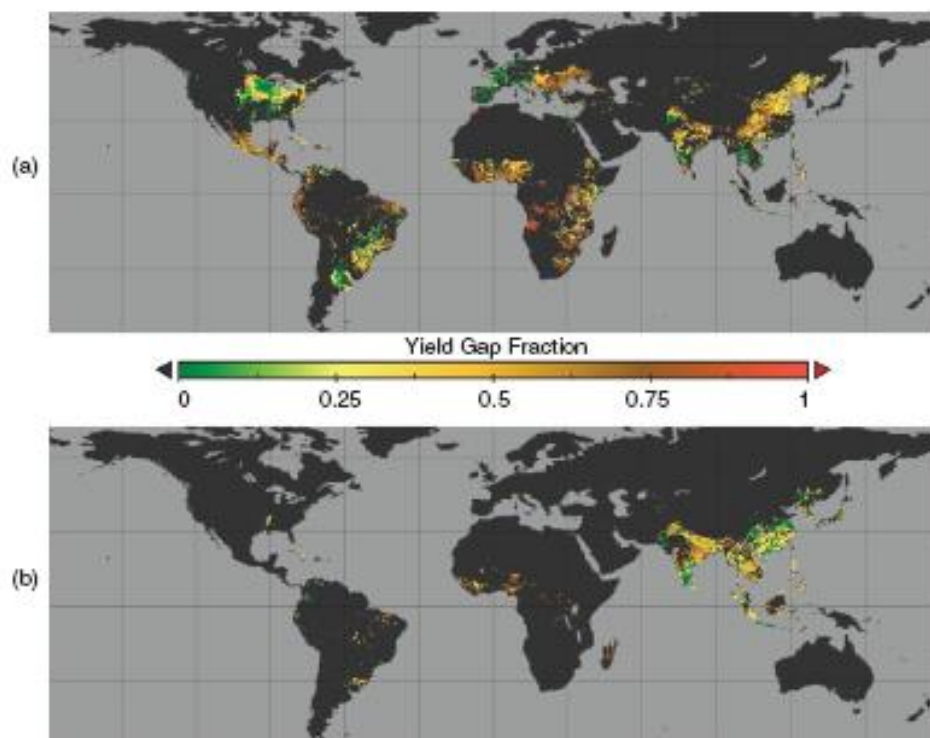


Figure 4.21 : Rapport entre le rendement réel et le rendement potentiellement atteignable selon les conditions climatiques pour le maïs (a) et le riz (b). Tiré de Licker et al. (2010).

Il est donc possible d'augmenter fortement les rendements en Afrique, ce sera d'ailleurs une condition indispensable pour le développement du continent compte-tenu de la croissance démographique et de la menace que fait peser le changement climatique sur l'agriculture. C'est là que l'utilisation de l'information climatique pour la stratégie agricole peut faire la différence, non seulement pour prévenir et minimiser les conséquences des aléas climatiques mais aussi pour offrir des opportunités de capitaliser sur un climat plus favorable. Ce sont ces bénéfices que peuvent offrir l'utilisation de l'information climatique pour la stratégie agricole à travers plusieurs formes (prévisions saisonnières, assurances agricoles, conseil sur les itinéraires techniques) que je vais développer dans ce qui suit.

4.5.1 Date de démarrage de la mousson et date de semis des cultures

Plusieurs études récentes ont été menées pour identifier les besoins des agriculteurs en termes d'information climatique par le biais d'enquêtes et de questionnaires adressés aux utilisateurs (Ingram et al. 2002 ; Klopper et al. 2006). Elles ont toutes fait ressortir l'intérêt des agriculteurs pour l'information climatique comme aide à la prise de décision. Ingram et al. (2002), à travers des enquêtes sur plusieurs catégories d'agriculteurs au Burkina Faso, a essayé de classer les indicateurs climatiques en fonction de leur importance perçue par les acteurs locaux pour l'aide à la décision agricole. Ces indicateurs sont, dans l'ordre d'importance croissante selon les agriculteurs du Burkina Faso : (i) les dates de démarrage et de fin de la saison des pluies, (ii) la répartition des pluies au sein de la saison humide et (iii) le cumul saisonnier des pluies. La date de démarrage des pluies est ainsi considérée comme l'indicateur climatique le plus important pour les agriculteurs car il conditionne la date de semis des cultures. Dans le cadre de la thèse de Romain Marteau, on a étudié la stratégie de semis des agriculteurs au Niger vis-à-vis de la pluviométrie à partir des données recueillies en milieu paysan pour la période 2004-2009 sur 10 villages situés sur le degré carré du Niger (Marteau et al. 2011). On a montré que dans la majeure partie des cas, les paysans sèment le mil après une première pluie significative au printemps (généralement apportant plus de 10 mm/jour), partant ainsi du postulat que cette première pluie marque le démarrage de la mousson. En l'absence d'information ou de prévision de la date de démarrage des pluies, les agriculteurs prennent ainsi le risque de perdre leur récolte si cette première pluie est provoquée par un événement isolé, caractéristique de la période que j'ai qualifiée de pré-démarrage de la mousson (Sultan et Janicot 2003), et se trouve suivie d'un épisode sec de plusieurs jours après le semis. On a ainsi montré que sur la période 2004-2009 sur les 10 villages du Niger qui ont été enquêtés, 22% des semis ont été perdus à cause d'un épisode sec qui s'est produit juste après le semis, autrement dit après un faux départ de la mousson.

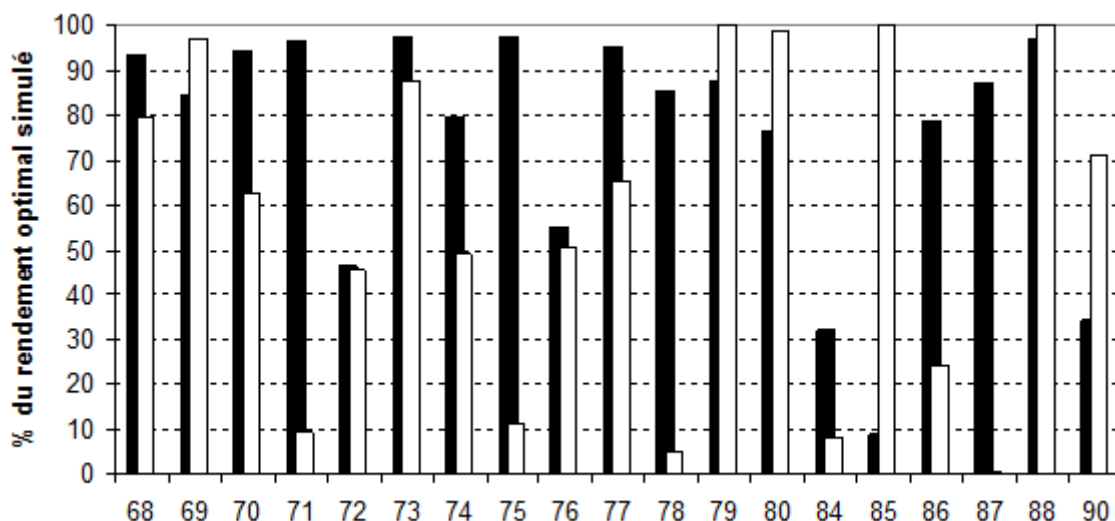


Figure 4.22 : Les rendements du mil simulés avec la méthode des seuils (en blanc) et en prenant en compte la mise en place de la mousson comme date de semis (en noir). Le rendement est exprimé en pourcentage par rapport au rendement maximum de l'année obtenu avec la date de semis idéale. Tiré de Sultan et al. (2005).

Dès lors qu'il est possible de définir pour chaque année une date du démarrage de la mousson selon le critère grande-échelle du saut de la mousson (Sultan et Janicot 2003), on peut s'interroger sur la pertinence d'utiliser cette information pour orienter les semis et ainsi éviter les pertes liées aux faux départs. J'ai donc réalisé une étude de modélisation avec le modèle

SARRAH (voir section 4.2.2) sur la période 1968-1990 pour mesurer la sensibilité du rendement agricole à la date de semis pour la culture du mil à Niamey (Sultan et al. 2005). Les simulations du modèle sur une parcelle de Niamey au cœur du Sahel ont montré qu'il est possible de relier la date de mise en place de la mousson définie à l'échelle régionale et la date de semis à l'échelle fine de la parcelle. Par rapport à des méthodes classiques de type seuil, traditionnellement utilisée pour déterminer la date de semis en milieu paysan, la prise en compte de l'installation de la mousson pour le choix de la date de semis montre une amélioration significative des rendements agricoles et une réduction de leur variabilité liée à l'occurrence de faux départs de la saison humide (Fig.4.22). En semant au moment de la mise en place de la mousson, on obtient en moyenne sur près de 20 ans de simulations 75% du rendement maximum potentiellement atteignable contre seulement 56% avec la méthode classique (Tab.4.2). Le calcul de la date de semis idéale du modèle sur la période 1968-1990 pour une variété de mil à cycle constant adaptée à la région de Niamey a montré une date moyenne au 22 juin très similaire à la date de mise en place de la mousson au 24 juin.

	Mise en place de la mousson	Méthode des seuils
moyenne	75%	56%
écart-type	26%	36%
Coefficient de variation	34%	64%

Tableau 4.2 : Paramètres caractéristiques pour 19 années de la période 1968-1990 du rendement simulé en semant au moment de la mise en place de la mousson et en utilisant la méthode des seuils pour le choix de la date de semis. Le rendement est exprimé en pourcentage par rapport au rendement maximum potentiellement atteignable.

Cette étude de modélisation mais aussi l'analyse des dates de semis observées au Niger (Marteau et al. 2011) mettent en évidence l'intérêt pour les agriculteurs de disposer sinon d'une prévision, du moins d'indicateurs signalant que la mousson a bel et bien démarré et que les semis peuvent être réalisés sans risques de perte des semences.

4.5.2 Les bénéfices potentiels de l'utilisation de la prévision saisonnière

Faire face à l'incertitude inhérente au climat est un défi et une contrainte pour l'agriculture où les paysans doivent prendre des décisions sensibles aux variations climatiques (choix des semences, choix des parcelles à cultiver, calendrier agricole) des mois avant que la saison des pluies ne commence (Meza et al. 2008). Dès lors, pouvoir disposer de prévisions sur le climat à venir peut aider les paysans à prendre des décisions cruciales pour réduire leur vulnérabilité (par exemple réduire le risque de perte de semences en semant au bon moment) mais aussi augmenter la rentabilité de leurs exploitations (par exemple semer des cultures de rente en cas de bonne saison des pluies). Ces prévisions existent bel et bien : les modèles climatiques les plus récents (Palmer et al. 2004 ; Van den Linden 2009) ou des modèles statistiques (Ward 1998; Fontaine et al. 1999; Ogallo et al. 2000; Ward et al. 2004) ont montré qu'ils étaient capables de prédire de manière satisfaisante les fluctuations du climat dans de nombreuses parties du monde (Hansen 2002). Cependant évaluer les bénéfices de ces prévisions pour les agriculteurs n'est pas chose facile car les prévisions sont par nature imparfaites et les applications de ces prévisions pour orienter la stratégie agricole n'ont été que partiellement développées et testées (Hammer et al. 2001 ; Hansen 2002). En Afrique de l'Ouest, même s'il existe un système de prévision opérationnelle en Afrique de l'Ouest qui fournit chaque année des prévisions des mois à l'avance sur la qualité de la saison des pluies à venir (le système

PRESAO ; Préviation Saisonnière en Afrique de l’Ouest ; Hamatan et al. 2004; Ward et al. 2004), il n’existe aucune étude qui évalue les bénéfices de la préviation saisonnière pour l’agriculture en Afrique sub-saharienne ni même pour l’agriculture de subsistance en générale ; toutes les évaluations actuelles ayant été faites pour les cultures de rente (Meza et al. 2008). Pourtant l’évaluation des bénéfices de l’utilisation de la préviation saisonnière est nécessaire pour orienter la recherche là où les bénéfices sont les plus importants (pour une catégorie d’exploitants par exemple ou bien avec la préviation d’un indicateur climatique plutôt qu’un autre) et pour attirer les partenaires institutionnels et les investissements (Thornton 2006; Meza et al. 2008). J’ai donc essayé de combler cette lacune en menant deux études d’évaluation des bénéfices économiques de l’utilisation de la préviation saisonnière pour orienter la stratégie agricole en Afrique de l’Ouest : une étude portant sur une exploitation au Sénégal en collaboration avec Bruno Barbier, économiste au CIRAD, et une étude sur la culture du mil au Niger en collaboration avec Philippe Quirion, économiste au CIRED avec je co-encadre la thèse de Philippe Roudier.

Evaluation des bénéfices de la préviation saisonnière pour l’agriculture au Sénégal

Dans le cadre du stage de master de Jeanne Fortilus et en collaboration avec Bruno Barbier, on a un construit un modèle bioéconomique calibré sur une exploitation agricole typique de Nioro du Rip qui se trouve dans la région semi-aride du Sénégal (Sultan et al. 2010). Le modèle est utilisé pour simuler les choix stratégiques optimaux (choix entre plusieurs variétés, entre plusieurs niveaux de fertilisation, choix d’allocation des terres cultivables au sein de l’exploitation) selon que les paysans ne possèdent aucune indication sur la saison des pluies à venir (notre simulation de contrôle) ou bien si les paysans reçoivent la préviation saisonnière. Le revenu net de l’exploitation pour ces différentes stratégies est alors calculé et le bénéfice de l’utilisation de la préviation saisonnière peut être estimé en faisant la différence entre le revenu simulé en utilisant la préviation saisonnière et celui issu de la simulation de contrôle. On calcule alors la valeur de la préviation de chaque modalité d’une préviation catégorielle du cumul saisonnier. Les trois catégories retenues sont basées sur les terciles (année sèche, normale et humide) pour reproduire le format de la préviation opérationnelle PRESAO.

		Préviation		
		Année sèche	Année normale	Année humide
Observation	Année sèche	+79,7	0	-70,1
	Année normale	-9,4	0	-10,8
	Année humide	-27,7	0	+6,5

Tableau 4.3 : Valeur des préviation saisonnières (en % par rapport au revenue net obtenu sans utiliser la préviation saisonnière). La valeur de la préviation d’une année sèche varie de +79.7% selon que l’année s’avère vraiment sèche (préviation parfaite) à -9.4% et -27.7% selon que l’année observée est respectivement normale ou humide (la préviation est fausse). La valeur de la préviation d’une année humide varie de +6.5% selon que l’année s’avère vraiment humide (préviation parfaite) à -10.8% et -70.1% selon que l’année observée est respectivement normale ou sèche (la préviation est fausse). La préviation d’une année normale n’a pas de valeur. D’après Sultan et al. (2010).

Du tableau 4.3, on déduit que la prévision des années sèches a plus de valeur économique que celle des années humides. En effet, elle permet à l'exploitation de réaliser un bénéfice de près de 80% par rapport au revenu sans l'utilisation de la prévision saisonnière et l'impact de l'erreur de la prévision est faible si l'année s'avère en réalité normale (une perte de -9.4% de revenu) et plus forte si l'année est en réalité humide (-27.7%). L'utilisation de la prévision des années humides préconise une stratégie trop risquée pour les paysans (notamment une forte proportion de maïs dédié à l'exportation à forte valeur économique mais très sensible à la contrainte hydrique) et le coût économique d'une prévision imparfaite est tel (jusqu'à une perte de 70% des revenus) que son intérêt est limité. Cette méthodologie a ensuite été utilisée pour évaluer la valeur économique des systèmes de prévisions existants sur l'Afrique de l'Ouest. Qu'elles soient issues de schémas statistiques ou de modèles climatiques, les prévisions saisonnières que l'on a évaluées présentent des scores de prédiction et des valeurs économiques similaires sur la période de référence considérée (1970-2000). Les deux types de méthodes statistiques et dynamiques aboutissent à une augmentation des revenus de respectivement 13.8% et 9.6% lorsque l'on considère uniquement la prévision des années sèches qui semblent seules avoir un intérêt économique pour l'exploitation que l'on a modélisée (Sultan et al. 2010).

Evaluation des bénéfices de la prévision saisonnière pour l'agriculture au Niger

Une méthodologie similaire a été utilisée dans le cadre de la thèse de Philippe Roudier et en collaboration avec Philippe Quirion mais pour évaluer cette fois les bénéfices de la prévision saisonnière pour la culture du mil au Niger (Roudier et al. 2011a). Pour reproduire de manière fine les itinéraires techniques des paysans, on utilise cette fois le modèle SARRAH qui est capable de simuler la réponse en rendement (que l'on traduit ensuite en revenu pour les agriculteurs) de changement de stratégies (date de semis, niveau de fertilisation, longueur de cycle et type de variété cultivée).

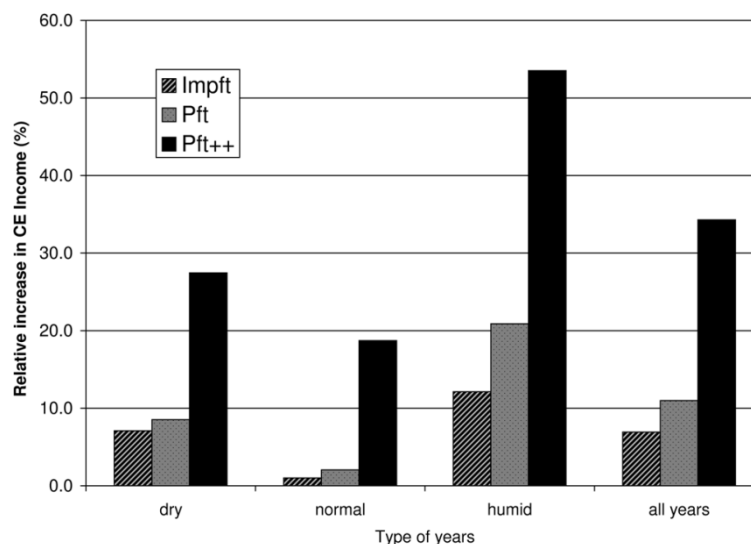


Figure 4.23 : Variations de revenus (%) liées à l'utilisation de la prévision saisonnière pour la culture du mil au Niger selon que l'année est humide, normale, sèche et pour l'ensemble des années. Trois types de prévisions sont considérées : « Impft » correspond à la prévision catégorielle imparfaite du cumul saisonnier (typiquement celle issue de PRESAO), « Pft » est la même prévision mais sans erreur, et « Pft++ » la prévision sans erreur avec en plus la prévision du début et de la fin de la saison des pluies. Tiré de Roudier et al. (2011a).

On a pu mettre en évidence un bénéfice de l'utilisation de la prévision quelle que soit le type d'année (sèche, normale ou humide) considérée avec une valeur maximale de la prévision qui

est cette fois atteint en cas d'année humide (Fig.4.23). On s'est ensuite intéressé à faire évoluer la qualité de la prévision saisonnière afin de voir comment le progrès de la prévision climatique se traduit en termes de bénéfices pour les agriculteurs au Niger. On a considéré trois types de prévisions : la prévision catégorielle imparfaite du cumul saisonnier (typiquement celle issue du système actuel PRESAO), la prévision catégorielle parfaite du cumul saisonnier (typiquement si on améliore fortement le système PRESAO sans changer les variables qu'il prévoit), et la prévision catégorielle parfaite du cumul saisonnier avec en plus la prévision du début et de la fin de la saison des pluies (typiquement si on rajoute améliore le système PRESAO avec des nouvelles variables prévues). Il est intéressant de constater que l'augmentation la plus forte du bénéfice de la prévision ne se réalise pas avec l'amélioration du score du système existant (le passage de la prévision imparfaite à parfaite n'entraîne qu'une augmentation faible du bénéfice espéré dans la figure 4.23) mais plutôt grâce à l'introduction de la prévision de variables supplémentaires comme le démarrage et la fin de la saison des pluies. Ce résultat confirme l'importance de la prévision de la date de démarrage des pluies pour l'agriculture que j'ai déjà montrée dans les travaux exposés précédemment (Sultan et al. 2005a ; Marteau et al. 2011) et qui a été soulignée très justement par les agriculteurs sahéliens comme la priorité en terme d'indicateur climatique à être inclus dans les systèmes des prévisions actuels (Ingram et al. 2002).

4.5.3 Les assurances agricoles basées sur des indices climatiques

La mise en place d'un système d'assurance agricole figure parmi les pistes possibles pour atténuer la vulnérabilité des agriculteurs aux fluctuations climatiques. Les assurances agricoles traditionnelles, basées sur la constatation d'une mauvaise récolte, sont actuellement peu développées dans les pays du Sud à cause de la difficulté d'évaluer les dommages et de l'asymétrie d'information entre le paysan et l'assureur. Depuis quelques années, des assurances basées sur des indices météorologiques (Skees et al. 1999) ont été lancées dans quelques pays en développement (Malawi, Ethiopie, Inde, Maroc) mais pas encore en Afrique de l'Ouest. Pourtant, elles pourraient y atténuer les conséquences potentiellement dramatiques d'une mauvaise saison des pluies pour les paysans. Elles pourraient également faire évoluer les pratiques agricoles vers des pratiques plus risquées mais bénéfiques en moyenne : augmentation des intrants, hausse de la part de cultures risquées mais en moyenne plus productives. Mon objectif a donc été de montrer le potentiel de ce type d'assurances en Afrique de l'Ouest où elles n'ont jamais été appliquées. A l'aide d'une base de données agricoles et pluviométriques détaillée sur le Burkina Faso, et d'hypothèses simples sur la forme d'un contrat d'assurance, nous avons cherché avec Philippe Quirion et Alexis Berg à étudier la faisabilité potentielle et l'intérêt pour les agriculteurs de ce pays d'une assurance climatique à indice (Berg et al. 2009). Pour cela, nous considérons les résultats de plus de 3000 contrats simulés sur 30 provinces, 21 ans (1984-2004) et 5 cultures (coton, mil, sorgho, maïs et arachide). Le principe du contrat d'assurance que nous avons considéré consiste à trouver un indicateur qui fait le lien entre les fluctuations pluviométriques et le rendement des cultures, ici le cumul pluviométrique annuel, et à indemniser le producteur lorsque la valeur annuelle de cet indice est inférieure à un certain seuil (en cas de sécheresse avérée par exemple ; Fig.4.24). Il est ressorti qu'un tel système d'assurance, même basé sur un indice simple comme le cumul pluviométrique de la saison des pluies, peut être efficace d'un point de vue économique. L'efficacité de ce type d'assurance est surtout déterminée par l'intensité du lien entre le climat et la culture (que l'on appelle le risque de base) mais surtout par la variance du rendement de la culture. Le maïs dont le rendement est le plus variable d'une année sur l'autre est la culture qui bénéficierait le plus de la mise en place d'un tel système d'assurance. D'autre part les zones à faible pluviométrie annuelle au Nord du Burkina Faso

pourraient également y trouver un bénéfice plus important du fait du lien plus fort entre les fluctuations climatiques et le rendement des cultures et des variations interannuelles importantes du rendement.

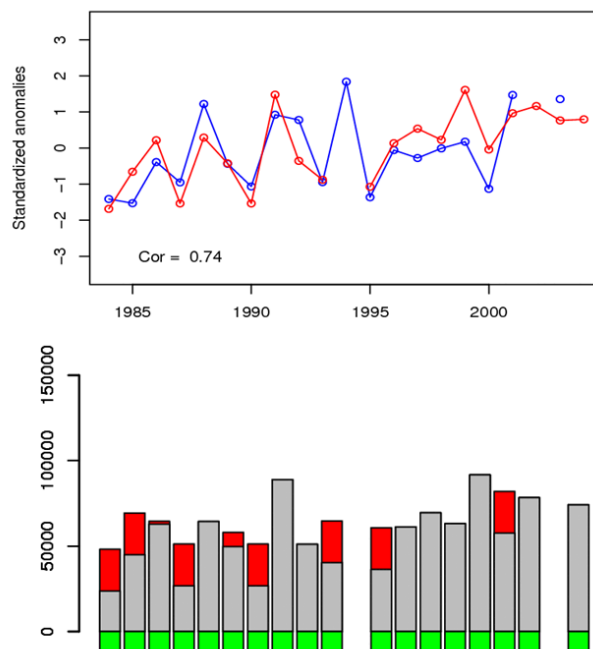


Figure 4.24 : Exemple de contrat d'assurance pour le Sorgho dans le district de Bam au Burkina Faso. Le graphique du haut montre l'évolution respective des rendements du sorgho (rouge) et de la pluviométrie annuelle (bleu) qui a servi d'indice pour la définition du contrat d'assurance. La figure du bas montre les revenus (FCFA) sans l'assurance en gris, les indemnités de l'assurance que perçoit l'agriculteur en cas de mauvaise année (rouge) et le coût annuel de l'assurance pour le producteur (en vert). Tiré de Berg et al. (2009).

Bien qu'aucun système d'assurance de ce type n'existe pas encore en Afrique de l'Ouest, il semble clair que ces systèmes pourraient réduire la variabilité des revenus d'une année sur l'autre pour les producteurs. D'ailleurs, la Banque Mondiale projette de mettre en place une expérience pilote d'assurance basée sur des indices climatiques (comme celle du Malawi) pour des producteurs d'arachide de bouche de qualité, dans la zone de Kaolack au Sénégal. Le CIRAD et le CERAAS, avec qui je collabore, ont été contactés pour réaliser un travail d'expertise pour les aider à le mettre en place. Il s'agirait d'une assurance destinée à des parcelles de qualité conduites par des producteurs solvables et bien encadrés techniquement de manière à ce que les rendements soient essentiellement déterminés par les contraintes hydriques. Les indices climatiques seront déterminés par un modèle de bilan hydrique simple (type famille Cropwat FAO). C'est un produit assurantiel qui devrait être géré par le secteur privé.

4.5.4 Perspectives

L'adaptation sera fondamentale pour réaliser les objectifs du Millénaire fixés par les Nations Unies d'ici 2015 et particulièrement dans le contexte du changement climatique en Afrique où c'est une question de survie (EU 2007). Je compte donc m'investir sur ce thème en particulier dans le cadre du projet ANR ESCAPE dédié à l'étude des changements environnementaux et aux solutions d'adaptation pour accroître la productivité agricole et réduire la vulnérabilité. Parmi les pistes que j'envisage, je souhaiterais poursuivre l'évaluation coût/bénéfice des prévisions saisonnières et des assurances à travers deux cadres différents. Le premier cadre est

la suite directe de mon travail, à savoir la construction, la calibration et l'application de modèle d'exploitation agricole qui combine les connaissances agronomiques, économiques et empiriques pour évaluer virtuellement le succès de telles mesures d'adaptation dans le contexte du climat actuel et celui du changement climatique. Le deuxième cadre est totalement nouveau puisque je souhaiterais faire intervenir cette fois les acteurs, grands absents de mon travail jusqu'à présent, dans cette évaluation à travers la mise en place d'ateliers participatifs où les producteurs seront à même de s'exprimer sur ces innovations, voire d'en proposer de nouvelles. Faire participer les acteurs dans ce processus de transfert de connaissances scientifiques vers les acteurs est très certainement un pré-requis pour l'adoption de ces mesures *in fine* pour l'aide à la décision.

Synthèse

J'espère avoir montré à travers ce chapitre que les fluctuations et les changements climatiques sont d'une importance primordiale pour l'agriculture en Afrique sub-saharienne. D'un côté les aléas climatiques peuvent être responsables de déficits de production et de graves crises alimentaires mais de l'autre côté la maîtrise et l'anticipation de la variabilité climatique peuvent être un premier pas vers une intensification de la production et l'achèvement des objectifs du Millénaire visant à une plus grande sécurité alimentaire en Afrique. L'étude des relations entre le climat et l'agriculture nécessite une approche pluridisciplinaire couplant notamment des outils issus de l'agronomie (modèles empiriques ou mécanistes simulant la réponse du rendement aux variations climatiques), de la science du climat (modèles climatiques capables de réaliser des projections du climat de quelques mois à un siècle d'échéance) et de l'économie (scénarios d'évolution de la société, modèles bioéconomiques, adaptation). Ces outils ayant tous été développés isolément pour répondre à des objectifs différents, leur couplage lui-même devrait être considéré comme une science à part entière (correction de biais, transfert d'échelle). Il génère toute une cascade d'incertitudes qui rend actuellement très incertaines les projections de l'agriculture dans le futur sous l'influence du changement climatique. J'ai néanmoins pu montrer qu'une approche d'ensemble à travers l'inter-comparaison d'approches, de modèles, de scénarios et de résultats est une voie nécessaire pour quantifier et réduire l'incertitude de ces projections (montrant notamment un possible et robuste impact négatif du rendement dans le futur sous l'effet du réchauffement climatique). Cependant il ne faut pas attendre plus de certitudes pour d'ores et déjà proposer des mesures d'adaptation qui soit à la fois scientifiquement pertinentes et socialement acceptables ; le climat d'aujourd'hui ayant déjà un impact sur les ressources des populations rurales. L'utilisation de l'information et la prévision climatique pour orienter la stratégie agricole peut permettre dans bien des cas que j'ai illustrés dans ce chapitre d'augmenter les revenus et de réduire la vulnérabilité de l'agriculture traditionnelle, un premier pas vers une plus grande sécurité alimentaire en Afrique.

5. Perspectives

Dans la suite de mon travail, je souhaiterais me focaliser sur l'étude de la variabilité et du changement climatique et ses applications sur la problématique du devenir de l'agriculture en Afrique de l'Ouest. Deux angles d'approche complémentaires mais très différents peuvent être envisagés : aller plus loin dans le détail dans le travail que j'ai mené en allant jusqu'à la confrontation des résultats de mes travaux avec la vision de l'agriculteur sahélien ou bien au contraire rester à des grandes échelles en faisant des études comparatives sur d'autres régions avec un climat similaire comme l'Inde par exemple. Dans ce qui suit je détaillerai les différentes pistes que je propose et qui s'inscrivent dans plusieurs projets en cours ou soumis, parmi lesquels le programme international AMMA, le projet ANR ESCAPE (2011-2015) et le Projet Pilote Régional (PPR) Sociétés Rurales Environnement et Climat (SREC) de l'IRD.

5.1 Variabilité et changement climatique au sahel

5.1.1 Le cycle saisonnier de la mousson

Mes travaux ont été les premiers à mettre en évidence le « saut » de la mousson à la fin du mois de juin qui caractérise la mise en place de la mousson en Afrique soudano-sahélienne. Les mécanismes à l'origine de ce « saut » sont complexes et multiples, résultant de la dynamique régionale du climat africain et de téléconnexions avec les autres régions tropicales et les régions extratropicales (la région méditerranéenne en particulier). Une meilleure compréhension de ces mécanismes est plus que jamais nécessaire même si ce n'est pas sur ce point que je compte m'investir dans le futur mais plus sur les applications agronomiques que je détaillerai en section 5.2. Au cours de mes travaux de recherche, je me suis davantage focalisé sur les applications agronomiques liées à l'étude de la mise en place de la mousson (voir chapitre 4 section 4.5). Même si la date de la mise en place de la mousson peut être parfois très différente de la date de démarrage des pluies qui détermine le démarrage des cultures au Sahel (Marteau et al. 2011), j'ai montré que tenir compte de cette date de « saut » de mousson pouvait augmenter fortement les rendements moyens et réduire les pertes de récoltes liées à un faux départ de la mousson (Sultan et al. 2005a). Dans le cadre de la thèse de Philippe Roudier, on a montré que les bénéfices de la prévision climatique pour les agriculteurs pouvaient être multipliés par un facteur 3 si on intégrait dans le système actuel la prévision des dates de démarrage et de fin de la mousson (Roudier et al. 2011a). Poursuivre les travaux sur la prévisibilité de cette date de démarrage de la mousson relève donc d'un intérêt crucial pour répondre à la demande des utilisateurs. Outre les modèles statistiques déjà développés dans la littérature, il existe plusieurs systèmes de prévision dynamique comme celle du Centre Européen à échéance de 45 jours mais aussi le système TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble TIGGE ; Bougeault et al. 2010) pour lequel les performances à prévoir la date de démarrage de la mousson n'ont encore jamais été évaluées. Compte-tenu de son importance pour l'agriculture (Roudier et al. 2011a), il conviendrait de faire des études similaires de prévisibilité sur la fin de la saison de mousson. Marteau et al. (2008) ont d'ailleurs montré que la prévisibilité de cette fin de la saison de mousson pouvait se révéler bien supérieure à celle de la mise en place de la mousson. Enfin, compte-tenu de la difficulté des modèles de climat globaux à représenter des caractéristiques régionales comme la mise en place de la mousson, il existe très peu de littérature explorant la façon dont le démarrage de la mousson mais aussi la fin de la saison humide peuvent évoluer dans le futur dans le contexte du réchauffement climatique. Pourtant des études récentes (Biasutti and Sobel 2009; Patricola and Cook 2010) ont montré que le seul signal robuste dans l'évolution des pluies au Sahel issu des simulations CMIP3 du GIEC est un décalage dans le cycle

saisonnier des pluies avec moins de pluies au début de la saison de mousson et plus de pluies sur la fin. Je souhaiterais donc explorer cette question de l'évolution du cycle saisonnier dans le futur en me basant sur un ensemble de simulations de modèles régionaux AMMA-ENSEMBLES à 50km de résolutions qui représentent de manière assez réaliste le « saut » de la mousson lorsqu'ils sont forcés par les réanalyses ERA-I. J'évaluerai dans un premier temps le cycle saisonnier de la mousson dans les modèles régionaux forcés avec ERA-I puis avec deux modèles globaux pour essayer par la suite de dégager des tendances pour le futur.

5.1.2 La variabilité intra-saisonnière

L'étude de la variabilité intra-saisonnière de la pluviométrie africaine a mis en évidence que les pluies de mousson tout au long de l'été s'organisent en séquences humides et sèches avec des périodicités variables. Des fluctuations autour de 15 jours semblent être liées à deux modes de variabilité régionale (Afrique et Atlantique Tropical): un dipôle quasi-bihebdomadaire zonal et un mode sahélien. Des fluctuations à plus basses fréquences autour de 40 jours semblent appartenir à un mode tropical plus vaste incluant la mousson indienne associé à une structure proche de celle de la MJO. Compte-tenu de l'importance des fluctuations intra-saisonnières de la mousson pour l'agriculture, l'évaluation de la prévisibilité de ces fluctuations et la mise en place de méthodes de prévision des séquences sèches de la mousson sont des pistes cruciales à explorer dans les prochaines années. De nombreuses méthodes ont démontré leur efficacité pour la prévision des phases actives et inactives de la mousson indienne (par exemple Chattopadhyay et al. 2008 ; Xavier et Goswami 2007). Elles sont même déjà été implémentées en opérationnel à l'IITM (Indian Institute of Tropical Meteorology, Pune, Inde). Je souhaiterais donc évaluer le potentiel de ce type de méthodes en Afrique et comparer leur qualité respective des prévisions dans les deux régions. En particulier, il pourrait être intéressant de faire des analyses composites pour comprendre pourquoi la prévision peut-être meilleure pour une année ou pour une région donnée et faire ainsi ressortir des indicateurs grande-échelle pouvant être utilisés comme indicateurs de confiance sur la prévision des modèles statistiques. D'autre part, en plus des prévisions dynamiques du Centre Européen, il existe maintenant de nouvelles prévisions d'ensembles issues de modèles dynamiques TIGGE et aucune évaluation n'a été faite à ma connaissance de ce système de prévision appliqué aux fluctuations intra-saisonnières en Afrique. Améliorer le score de prévision des fluctuations intra-saisonnières en utilisant de nouvelles méthodes statistiques ou l'état de l'art des systèmes de prévision dynamique devrait pouvoir faire évoluer à terme les produits diffusés par les systèmes de prévision opérationnelle comme PRESAO vers des variables comme les séquences sèches au sein de la saison humide plus proches des attentes des utilisateurs. Enfin, à une autre échelle, celle du changement climatique, je souhaiterais évaluer la façon dont les fluctuations intra-saisonnières en Afrique et en Inde (mais aussi leurs interactions telles que les ont observées Janicot et al. 2009) sont représentées dans les nouvelles simulations des modèles du GIEC AR5 et comment elles pourront potentiellement évoluer dans le futur. Ces analyses diagnostiques seront réalisées dans un premier temps dans les simulations des deux modèles français, le modèle de l'IPSL et celui du CNRM, pour lesquels les simulations sont d'ores et déjà disponibles puis appliquées à l'ensembles des modèles de l'exercice CMIP5 au fur et à mesure de leur mise en ligne.

5.1.3 La prévision et les applications

D'importants progrès ont été réalisés ces vingt dernières années pour prévoir les fluctuations climatiques et les événements météorologiques majeurs des jours, voire des mois à l'avance avant qu'ils ne se réalisent. En Afrique, ces progrès ont fait émerger des forums annuels

PRESAO et GHACOF qui réunissent les experts du climat et de la météorologie appartenant aux services météorologiques et hydrologiques nationaux pour réaliser une prévision de la saison à venir chaque année depuis 1998 (Ward et al. 2004). Les plus grands centres internationaux (ECMWF, UKMO, Météo-France, NCEP et IRI) contribuent à ces forums. Cependant même si un effort important est réalisé pour la communication des prévisions aux décideurs et utilisateurs potentiels (des acteurs de la santé publique, des secteurs de l'eau ou de l'agriculture sont régulièrement invités), l'utilisation de ces prévisions pour l'aide à la décision ou pour son intégration dans des systèmes d'alerte précoce rencontre au moins deux obstacles. D'abord il y a un fossé entre la communauté des prévisionnistes et celles des utilisateurs potentiels se traduisant par une inadéquation entre ce qui est produit par ces systèmes de prévision et l'attente des utilisateurs :

- l'échelle spatiale ou temporelle est inadéquate requérant l'application de désagrégation et/ou de méthodes de corrections de biais qui sont pourtant largement répandues dans la communauté scientifique (voir par exemple Oettli et al. 2011);
- les variables prévues ne sont pas celles qui intéressent les utilisateurs comme le démontre l'étude d'Ingram et al. (2002) où le cumul saisonnier des pluies sur lequel se focalise le forum PRESAO est la dernière priorité des agriculteurs avec un faible potentiel pour augmenter leurs revenus (Roudier et al. 2011a);
- les délais de prévisions proposés ne correspondent pas à ceux requis pour orienter des décisions stratégiques ce qui peut s'illustrer par exemple la prévision saisonnière PRESAO qui est souvent diffusée après le semis des cultures et il ne reste alors que très peu de marge de manœuvre à l'agriculteur pour ajuster sa stratégie ;
- le degré de confiance de la prévision et surtout la peur de l'erreur limite souvent à la fois l'utilisation de la prévision (une prévision fautive ou mal interprétée peut être préjudiciable pour l'utilisateur éventuel) mais aussi la façon dont elle est communiquée à l'utilisateur (il n'est pas rare de lire sur un bulletin PRESAO que pour une région donnée l'année sera normale à excédentaire mais que les probabilités sont faibles et qu'il faudra faire attention aux risques d'inondation et/ou au risque de déficit pluviométrique au cœur de la saison ; difficile de prendre une décision avec pareille prévision !). Bien qu'essentielle pour l'amélioration de tout processus, l'évaluation des prévisions du forum PRESAO, dans son ensemble et pour chaque modèle qui contribue à la prévision consensuelle n'a jamais été réalisée.

Autre fossé, celui qui se creuse entre la communauté des prévisionnistes¹ et celle des scientifiques. Même si des progrès significatifs ont été réalisés dans le cadre de AMMA sur la prévision du démarrage de la mousson (Fontaine et Louvet 2006 ; Fontaine et al. 2008) et sur la prévision saisonnière du cumul pluviométrique par des schémas statistiques (Fontaine et al. 1999), ces travaux n'ont jamais été intégrés aux méthodes utilisées au sein du forum PRESAO. De plus, les services météorologiques nationaux n'ont souvent pas accès à l'état de l'art des modèles numériques de prévision (ou du moins ne reçoivent que des sorties graphiques et/ou ne disposent pas de longues simulations pour les évaluer sur leur région d'intérêt). Par exemple les prévisions mensuelles du centre européen ECMWF qui sont à plus haute résolution avec des performances meilleures sur l'Afrique que les systèmes existants (Tomkins, 2010, communication personnelle) ne sont pas distribuées en Afrique ni même disponible sur le satellite de communication EUMETCAST. A mon sens ce deuxième fossé relève plus d'un problème structurel et pourrait être en partie comblé par plus de moyens pour

¹ J'entends par communauté des prévisionnistes, les personnes impliquées dans l'élaboration ou la diffusion de produits de prévision opérationnelle

favoriser l'interface entre les communautés des climatologues, des prévisionnistes et des utilisateurs à l'image par exemple des financements européens du 7^{ème} PCRDT autour des systèmes d'alerte précoce ou bien à l'image du travail de l'African Desk aux Etats-Unis. Ce dernier institut développe un partenariat entre le NCEP et les services météorologiques africains, via des échanges bilatéraux de personnes et de données, des formations, et collabore activement avec le projet Famine Early Warning System (FEWS) de l'USAID en développant des produits spécifiques aux problèmes de sécurité alimentaire et de ressources en eau en Afrique. L'IRI (Université de Columbia, Etats Unis), l'ICTP (Trieste, Italie) et l'IBIMET (Florence, Italie) ont également des missions similaires et un fort rayonnement en Afrique. En revanche je n'ai pas connaissance de l'équivalent en France.

C'est davantage sur le premier fossé que j'ai mentionné que souhaiterais m'investir dans les années qui viennent car je pense qu'il peut être réduit en menant une science aux frontières entre la climatologie et les applications, entre les scientifiques et les utilisateurs. C'est ce que je vais décrire dans les lignes qui suivent à travers des études que je souhaite mener sur le climat et l'agriculture.

5.2 Variabilité, changements climatiques et agriculture au sahel

La modélisation des impacts du climat sur l'agriculture, le couplage de cette modélisation avec les outils de la communauté du climat, les changements environnementaux et les options d'adaptations pour en atténuer les effets négatifs sont autant de pistes que je souhaiterais poursuivre ou initier dans les années qui viennent.

5.2.1 La modélisation agronomique

La poursuite du travail sur l'amélioration et l'inter-comparaison de modèles agronomiques présentent un intérêt certain puisque c'est cette modélisation qui servira ensuite de base à de multiples applications sur le changement climatique et l'adaptation. Parmi les pistes possibles, trois me semblent particulièrement pertinentes : la prise en compte de la diversité intra et inter variétale, l'amélioration de l'hydrologie, la comparaison multi-modèles et multi-régions.

La prise en compte de la diversité intra et inter variétale : Dans la synthèse sur les effets du changement climatique que j'ai réalisée avec Philippe Roudier dans le cadre de sa thèse (Roudier et al. 2011b), nous avons montré que les impacts du réchauffement global sur les rendements pouvaient être fortement modulés pour une même culture selon la variété que l'on considère. Smith et al. (1996) et Salack (2006) ont montré que les conséquences du changement futur sur les rendements varient de -44% à -29% pour des mils précoces et -21% to -14% pour des mils tardifs. Or l'agriculture sahélienne est caractérisée par une très grande diversité des espèces et variétés cultivées résultant du contexte historique et culturel mais aussi souvent symptomatique d'une stratégie d'adaptation aux variations climatiques. L'étude de cette diversité est par exemple l'objet du projet ANR PLANTADIV qui a montré que la seule région entourant le lac Tchad présente des centaines de variétés cultivées et que les facteurs expliquant cette agrobiodiversité et son évolution étaient multiples et complexes. S'il est irréaliste de représenter toute cette diversité au sein d'un modèle agronomique, il est possible de tenter de construire quelques grands idéotypes adaptés aux agrosystèmes africains pour les principales cultures (par exemple des mils améliorés à cycle court et des mils traditionnels à cycle long) dans le modèle SARRAH en collaboration notamment avec les agronomes du CIRAD et l'AGRHYMET. La sensibilité aux variations climatiques pouvant être très différente, il sera alors important dans le cadre des études des impacts du changement

climatique de faire des simulations du modèle SARRAH avec plusieurs de ces grands idéotypes pour analyser la variété des réponses en termes de rendement. On sera alors en mesure d'évaluer les effets de la diversité inter-variétale comme mesure d'adaptation pour atténuer les impacts du changement climatique sur la production agricole.

Un autre point important concerne les différences intra-variétales. La comparaison de deux échantillons génétiques de mil entre 1976 et 2003 sur le Niger (Besançon et al. 2009) a montré que la plante s'est adaptée à la sécheresse qui a marqué cette période en fleurissant plus tôt. Cette adaptation s'est faite par sélection génétique naturelle d'un allèle de précocité (Mariac et al. 2011). Est-ce que cette adaptation génétique a eu un rôle important pour atténuer la baisse de productivité du mil liée à la sécheresse du siècle dernier ? Est-ce qu'elle jouera un rôle pour atténuer les effets du changement climatique ? Un travail spécifique sur l'introduction de ces variations génétiques dans le modèle SARRAH en collaboration avec l'IRD, le CIRAD et l'AGRHYMET au Niger pourrait permettre de répondre en partie à ces questions. Il fait partie d'une des pistes envisagées pour le PPR SREC.

L'amélioration de l'hydrologie dans les modèles agronomiques : La prise en compte du ruissellement pour l'estimation du rendement est un élément essentiel dans la mesure où elle conditionne l'eau disponible pour la plante. Or jusqu'à présent la représentation du ruissellement dans les modèles agronomiques comme SARRAH est assez frustrante et pourrait bénéficier des derniers travaux et observations menés dans le cadre du projet AMMA notamment. Un effort a déjà été mené à HSM via le modèle de végétation Treegrass couplé au modèle hydrologique abc-rwf (Boulain et al. 2006 ; 2009). Ce modèle a été adapté pour un milieu sahélien avec des cultures. Il simule à la fois les flux d'eau et la production végétale et permet de quantifier l'impact du changement de l'occupation des sols sur les flux d'eau. Par exemple ces travaux ont montré que lorsqu'on augmente la surface cultivée, on augmente le ruissellement. Cependant ce modèle ne simule que la biomasse et ne permet pas d'aller jusqu'à l'évaluation du rendement. Pour évaluer l'impact de la représentation du ruissellement sur le rendement, on peut utiliser le modèle SARRAH. Plusieurs options peuvent être envisagées en collaboration avec le CIRAD et HSM :

- Elaborer dans un premier temps un modèle simple reliant l'intensité de la pluie au ruissellement ; l'intensité de la pluie étant le premier facteur de ruissellement ;
- Utiliser le modèle hydrologique plus complexe abc-rwf, qui permet une meilleure représentation des processus de redistribution latérale et d'infiltration verticale de l'eau pendant les épisodes pluvieux.
- forcer le modèle SARRAH avec l'eau du sol modélisée et comparer les rendements simulés obtenus avec les observations de rendement.

Cette étude pourrait être d'autant plus facile à mener que l'on dispose d'un observatoire commun sur l'agriculture et l'hydrologie dans cette région autour de Niamey mise en place dans le cadre du programme AMMA. L'année 2007 pourrait être choisie comme cas d'étude car il y a eu une sécheresse prolongée sur le degré carré de Niamey qui a eu un impact sur le rendement observé. Or le modèle sous-estime le stress hydrique et surestime l'eau disponible pour la plante pendant cette phase de sécheresse. Ce travail fait partie d'une des pistes envisagées pour le PPR SREC et pourra être réalisé dans le cadre du projet ANR ESCAPE.

Une autre problématique liée à l'hydrologie et à l'agriculture est celle du recours à l'irrigation. Face aux besoins prioritaires alimentaires et à l'incapacité de l'agriculture pluviale de subvenir à ces besoins, le développement de l'irrigation apparaît comme un recours

possible (Legoupil et al. 2000). Or, le continent utilise à peine 1,6% de ses réserves disponibles en eau pour l'irrigation, contre 14% en Asie. Les outils et les compétences au sein de l'IPSL et du GIS CES pourraient permettre de répondre à plusieurs grandes questions sur le climat et l'irrigation, en particulier grâce au modèle ORCHIDEE qui intègre à la fois une hydrologie capable de calculer l'eau disponible pour l'irrigation (en calculant notamment explicitement les débits, les pompages dans les nappes) et maintenant depuis la thèse d'Alexis Berg une représentation des cultures tropicales : comment vont évoluer le besoin et la disponibilité en eau pour l'irrigation dans le cadre du changement climatique ? Les infrastructures (barrages, bassin de rétention d'eau, zones irriguées) et les règles de gestion de l'eau actuelles seront-elles adaptées à cette évolution ? Ces deux questions font d'ailleurs l'objet d'un projet pluridisciplinaire (agronomie, hydrologie, climat, économie) soutenu par GIS-CES qui débutera en 2011 en collaboration avec le LMD, deux laboratoires d'économie le CIRED et le PREG et l'institut burkinabé 2IE. Enfin, il est important de rappeler qu'à l'échelle locale l'irrigation modifie de façon importante le bilan d'énergie de surface et les conditions atmosphériques, ce qui peut avoir un impact sur la dynamique atmosphérique à plus grande échelle (Sacks et al. 2008, Puma et al. 2010). En utilisant le modèle ORCHIDEE, Matthieu Guimberteau a aussi montré que l'irrigation a un impact sur la mousson en retardant son installation (Guimberteau 2010). On pourrait alors envisager de comparer, par exemple, l'impact direct de l'irrigation sur la productivité agricole et l'impact indirect via l'effet sur le climat. Un modèle comme ORCHIDEE-mil permettrait d'aborder ces questions de façon cohérente du point de vue de la modélisation.

La comparaison multi-modèles et multi-régions : La comparaison des qualités respectives de prédiction du rendement des modèles empiriques et mécanistes sur plusieurs régions (y compris ailleurs qu'en Afrique dans d'autres régions tropicales) et plusieurs cultures (y compris des cultures irriguées comme le riz) me paraît très pertinente en ce sens qu'elle peut mettre en évidence des effets d'échelle, de qualité de données (de forçage ou de validation) et/ou du poids plus important d'une variable climatique. De plus c'est un aspect très original car jusqu'à présent les études d'impacts sont toutes focalisées sur une région en particulier et de fait les résultats sont souvent difficiles à généraliser. Dans ce cadre je participe au projet ANR PICREVAT qui vise à analyser la prévisibilité potentielle des rendements agricoles dans trois agrosystèmes différents : au Nord-Cameroun (coton, mil, sorgho), en Argentine (soja, maïs) et au Kenya-Tanzanie (sorgho, riz pluvial). L'analyse comparée de la relation entre le climat et l'agriculture dans ces trois régions et de leur poids respectif par rapport aux autres contraintes environnementales et socio-économiques, menée en collaboration avec le CRC, le CEREGE et le CIRAD, peut être extrêmement enrichissante. Une autre région proche de l'Afrique en termes de climat est le subcontinent indien soumis également à un régime de mousson. Le type de culture est aussi très proche de celui de l'Afrique (arachide, mil, sorgho, riz) même si les systèmes de cultures sont beaucoup plus intensifiés en Inde (irrigation, intrants, mécanisation). Comparer le poids respectif de la contrainte climatique sur les rendements dans ces deux régions tropicales peut faire ressortir des éléments particulièrement intéressants. Par exemple, le modèle ORCHIDEE-Mil a été appliqué sur l'Inde pour simuler le rendement du sorgho et les scores de prédiction sont meilleures qu'en Afrique de l'Ouest et dépassent la simple corrélation avec les pluies annuelles sur la région. Comprendre les raisons pour lesquelles un modèle mécaniste est meilleur ou moins bon par rapport à un modèle empirique dans deux régions de mousson que sont l'Inde et l'Afrique peut apporter une vision originale à l'analyse comparée des deux régions.

L'intercomparaison de modèles est une approche privilégiée en climatologie pour quantifier les incertitudes notamment dans le contexte du changement climatique avec le projet CMIP

(Climate Model Intercomparison Project) qui a démarré en 1995 et qui en est à sa 5^{ème} phase. Pourtant cette approche n'est que rarement employée pour les modèles d'impacts alors que les résultats issus d'un modèle ou d'un autre sont susceptibles de varier fortement. Les résultats du projet REXHYSS financé par le GICC sur l'impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans le Nord de la France illustrent très bien ce propos. La figure 5.1 reporte la moyenne et l'écart-type des impacts du changement climatique sur les débits de la Seine en 2100 en utilisant plusieurs modèles de climat (GCM_FS et GCM_MS), cinq modèles hydrologiques (HYDRO), plusieurs méthodes de désagrégation (DESAG) et plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre (SRES). On peut voir que le deuxième facteur introduisant le plus d'incertitudes dans la quantification des impacts, après le choix du GCM, est le choix du modèle hydrologique. Même si cela concerne une région avec un climat très différent et un secteur différent, il doit certainement en être de même lorsqu'on quantifie les impacts agronomiques du changement climatique en Afrique mais il n'existe aucune étude à l'image de celles menées dans REXHYSS pour le mettre en évidence.

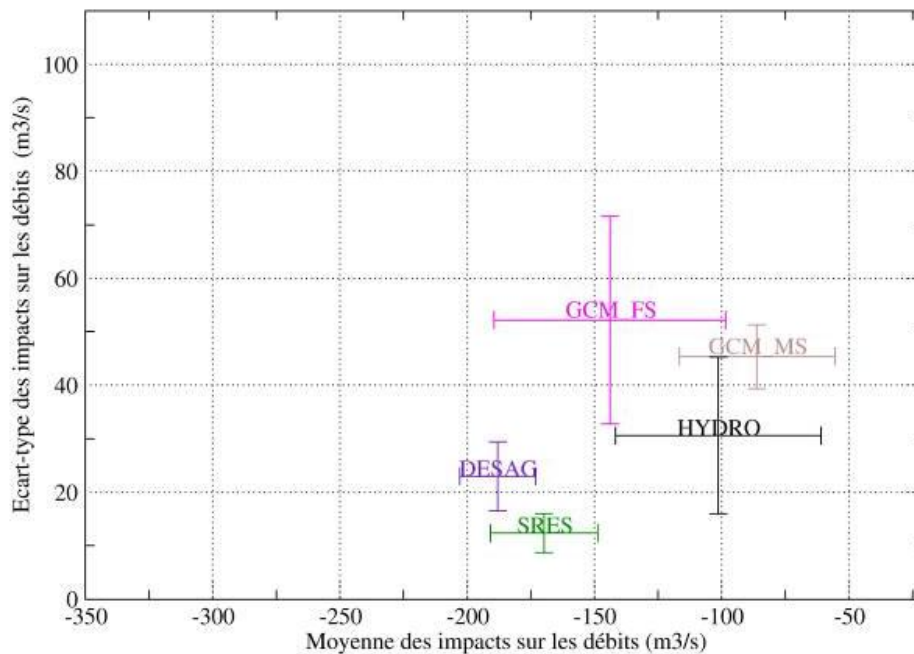


Figure 5.1 : Ecart-type et moyenne des impacts du changement climatique sur les débits de la Seine en 2100 selon plusieurs modèles de climat (GCM_FS et GCM_MS), cinq modèles hydrologiques (HYDRO), plusieurs méthodes de désagrégation (DESAG) et plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre (SRES). Courtesy of A. Ducharne.

Le projet international AGMIP (Agricultural Model Intercomparaison Project), lancé en Décembre 2010, est le premier projet sur le modèle de CMIP visant à analyser l'incertitude autour des prédictions agronomiques. Dans ce cadre, des simulations coordonnées seront réalisées dans plusieurs régions du globe avec un large nombre de modèles agronomiques avec comme objectifs de quantifier le risque que fait peser le changement global sur la sécurité alimentaire et renforcer les capacités d'adaptation des pays du Sud et du Nord face à ce risque. Il contribuera également à préparer le prochain rapport du 2^{ème} groupe travail du GIEC. Je prévois de contribuer à ce projet en poussant à placer l'Afrique comme une région clé de ces intercomparaisons, en réalisant des simulations dédiées d'ORCHIDEE-Mil et de SARRAH et en analysant l'ensemble des simulations des autres modèles qui auront tournées

sur l'Afrique et l'Inde. Dans ce cadre, j'ai également répondu à un appel d'offre pour un projet de collaboration avec David Lobell de l'Université de Stanford autour de la comparaison entre les modèles statistiques de David Lobell (voir Schlenker et Lobell 2010), le modèle agronomique DSSAT et le modèle SARRAH en Afrique de l'Ouest. Ce projet si financé représentera une contribution significative au projet AGMIP.

5.2.2 La régionalisation et le couplage entre climat et agriculture

Dans le cadre du séjour postdoctoral de Pascal Oettli, on a analysé l'incertitude dans la prédiction du rendement lié au choix de la méthode de régionalisation (Oettli et al. 2011). L'utilisation des simulations de RCM forcés par ERA-I issues du projet ENSEMBLES a montré que le choix du modèle régional pouvait affecter très fortement le rendement simulé par le modèle agronomique SARRAH et que l'on pouvait réduire efficacement les biais des RCMs en les combinant avec une méthode statistique développée par Mathieu Vrac au LSCE (Oettli et al. 2011). Plusieurs pistes restent à explorer à la suite de ce travail :

Analyse des biais des modèles régionaux du point de vue des impacts : D'abord, je souhaiterais poursuivre plus avant l'analyse des biais des modèles de climat issus de AMMA-ENSEMBLES pour leur utilisation dans le cadre d'études d'impacts. En particulier, pouvoir identifier quelles sont les échelles (saisonniers, intra-saisonniers, synoptiques) et les variables clés pour la simulation des impacts me semble un message important à apporter à la communauté des modélisateurs du climat. Dans le cadre de la thèse de Seyni Salack à l'UCAD, nous avons commencé à décomposer l'effet sur le rendement simulé lié à la mauvaise représentation de la pluviométrie des modèles régionaux du projet ENSEMBLES en deux échelles de temps : l'échelle saisonnière et l'échelle intra-saisonnière. Nous souhaitons ainsi évaluer les simulations des modèles régionaux non seulement sur leur capacité à représenter ces deux échelles de temps pour la pluviométrie mais aussi vis-à-vis des erreurs que ces biais introduisent dans les simulations de rendement. L'étude de Oettli et al. (2011) pourra alors être reproduite avec les mêmes modèles régionaux mais forcés par des GCMs sur la période actuelle et future de manière à analyser le biais lié au modèle grande échelle mais également quantifier l'incertitude liée à la régionalisation dans la simulations des impacts du changement climatique en Afrique de l'Ouest. La pertinence de l'utilisation d'une méthode de correction de biais dans le cadre des projections futures pourra également être évaluée.

Quelle configuration optimale d'un modèle régional pour les impacts ? Ensuite pour aller plus loin, il me paraît nécessaire de m'investir dans l'utilisation d'un modèle de climat (le modèle LMDZ ou bien le modèle régional WRF) pour, sinon mieux comprendre le pourquoi des biais des modèles à travers des études de sensibilité, ou à défaut réaliser un ensemble de simulations du modèle de climat pour trouver les ingrédients optimaux (résolution, correction de biais, paramétrisation) pour une meilleure prédiction des impacts agronomiques. L'article de Pohl et al. (2011) est une parfaite illustration d'une étude de sensibilité réalisé avec le modèle WRF pour quantifier les incertitudes dans la représentation du cycle saisonnier des pluies en Afrique de l'Est lié au choix des paramètres, des schémas de surface et de rayonnement, de la carte d'usage des sols, des conditions latérales et de la géométrie du domaine de simulation. Le même type d'étude de sensibilité en collaboration avec Benjamin Pohl au CRC pourrait être mené en Afrique de l'Ouest en ne prenant non pas les précipitations pour évaluer la qualité de la simulation mais les rendements simulés par le modèle SARRAH qui intègrent plusieurs variables climatiques (températures, pluie, rayonnement). La meilleure des combinaisons pourra alors être retenue pour réaliser des études d'impact du changement climatique en les combinant avec les méthodes de correction

de biais déjà utilisées par Oettli et al. (2011). Ce travail pourra s'intégrer dans le cadre du projet DECAF soumis à l'ANR par Frédéric Hourdin et dans l'ANR ESCAPE. Sur le plan international il s'inscrira dans le cadre du projet international CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment) qui rassemble la communauté scientifique internationale autour de l'amélioration des simulations à haute résolution du climat sur l'ensemble du globe dédiées pour les impacts et l'adaptation au changement climatique. Je souhaiterais donc y contribuer en apportant des métriques d'évaluation orientées vers les impacts agronomiques du climat.

Analyse des biais des estimations de pluies par satellite du point de vue des impacts : Ce concept de métriques d'évaluation orientées vers les impacts agronomiques pourrait d'ailleurs être aisément transposé aux algorithmes d'estimation de pluies par satellite. Cette application aurait du sens pour au moins deux raisons. Dans le cadre du projet AMMA, un effort important a été fait pour améliorer et évaluer les estimations de pluie par satellite en Afrique (Jobard et al. 2009 ; Berges et al. 2009) et il serait important de voir comment les biais inhérents à cette estimation se répercutent sur les simulations de rendement agricole. L'autre raison est que du fait de la difficulté d'acquérir des pluies en temps réel en Afrique, de nombreux systèmes d'alertes précoces comme ceux développés par l'IBIMET et l'AGRHYMET (Samba et al. 2001) utilisent les estimations satellites de pluies pour les traduire en termes de risques pour la saison de cultures. Or même si les sorties de ces SAPs sont communiquées aux décideurs, on a très peu d'idée sur les incertitudes liées à l'utilisation d'un produit satellite plutôt que la pluie observée ou bien plutôt qu'un autre produit satellite pour ces applications pourtant cruciales pour l'aide à la décision. Cette étude pourrait être menée en collaboration avec PRODIG et le LMD qui ont développé et évalué les estimations satellites de la pluie dans le cadre du programme AMMA et avec l'AGRHYMET et l'IBIMET qui utilisent ces données satellites pour les applications. Enfin, cette étude pourrait être étendue à l'estimation des autres variables climatiques importantes pour la prédiction des rendements comme le rayonnement, la température et l'évapotranspiration.

5.2.3 Les impacts du changement climatique

L'étude des impacts du changement climatique nécessite la mise en place d'une méthodologie souvent complexe avec des outils tirés de l'économie, de la science du climat, de la statistique et de la modélisation des impacts (agronomie, hydrologie, santé par exemple), ayant chacun leurs barres d'erreurs et leurs limites. A l'image de ce qui a été réalisé dans le cadre du projet REXHYSS coordonné par Agnès Ducharne (SYSIPHE) sur les débits futurs en Ile de France, le défi à relever ne réside donc pas tant dans l'estimation déterministe et vraisemblablement inatteignable de l'évolution future des rendements mais dans la quantification, la hiérarchisation et la réduction des incertitudes associées aux projections des impacts du changement climatique. Le cadre des nouveaux projets internationaux CORDEX d'inter-comparaison de méthodes de régionalisation et d'AGMIP d'inter-comparaison des modèles agronomiques, dans lesquels je souhaite m'investir dans les prochaines années, marquera très certainement un tournant vers une meilleure prise en compte de cette incertitude à travers des études coordonnées dédiées aux impacts du climat sur l'agriculture qui étaient jusqu'à lors menées de manière très isolée et fragmentée. Cependant, la réduction des incertitudes sur les impacts agronomiques du changement climatique ne se fera pas sans la réduction des incertitudes sur le devenir des pluies dans le futur et donc la nécessaire amélioration des modèles de climat quant à leur représentation des précipitations même si ce n'est pas un travail sur lequel je vais m'investir dans le futur. Le cadre du projet DECAF soumis à l'ANR s'il est financé permettra très certainement des avancées significatives dans ce domaine. De

plus, les nouveaux modèles et les nouvelles simulations de CMIP5 pour le 5^{ème} rapport du GIEC pourront peut-être permettre des avancées nouvelles sur les projections futures du climat.

L'analyse des simulations CMIP3 : A l'heure actuelle, en dépit du fait qu'il n'y a pas de consensus entre les modèles de climat quand à l'impact du réchauffement climatique sur les pluies annuelles au Sahel (Cook and Vizzy 2006; Druryan 2010), quelques études récentes (Biasutti and Sobel 2009; Patricola and Cook 2010) ont trouvé un signal robuste entre les différents modèles du GIEC CMIP3 qui atteste d'un décalage de la saison de mousson (un assèchement en début de saison et une augmentation des pluies à la fin de la saison). Il pourrait être intéressant d'évaluer les conséquences de ce décalage dans le cycle saisonnier en termes de rendements des cultures et des calendriers agricoles (semis plus tardifs, variétés à cycles longs ou courts) à partir du modèle SARRAH. C'est un des points sur lequel portera le projet de collaboration que j'ai soumis avec David Lobell. Une étude plus spécifique pourrait également être menée sur la culture du coton au Nord Cameroun. En effet dans le cadre de la thèse de Marthe Bella-Medjo, on a montré que les rendements du coton pouvaient être assez sensibles à la pluie du mois de Juin. Si le décalage mis en évidence par Biasutti et Sobel 2009 se vérifie sur des projections régionales au Nord Cameroun, cet effet, combiné à celui de l'augmentation des températures qui a un impact négatif sur le cotonnier, pourrait compromettre sérieusement la production de coton dans le contexte du changement climatique.

L'analyse des simulations CMIP5 : Enfin il sera intéressant dès lors que les nouvelles simulations de l'AR5 seront disponibles d'analyser la robustesse des résultats que j'aurai ou que j'ai obtenus avec les simulations précédentes de l'AR4. Toute la chaîne de traitement mis au point avec Alexis Berg notamment (Berg et al. 2011) pour estimer les impacts du changement climatique sur l'agriculture devra être réactualisée au regard des nouvelles simulations pour alimenter le groupe de travail sur les impacts (WGII) du GIEC. Est-ce que la baisse généralisée des rendements que l'on a mis en évidence dans les Tropiques va se confirmer ou s'infirmer ? Est-ce qu'elle sera amplifiée ou atténuée par l'effet des changements de précipitations ? L'incertitude de ces projections va-t-elle diminuer ou augmenter ? Est-ce que le décalage de saisonnalité observé par Biasutti et Sobell (2009) va se confirmer ? Même si je n'ai aucune réponse à toutes ces questions, je n'ai qu'une certitude c'est que tout le travail qui a été mené depuis le 4^e rapport du GIEC notamment dans le cadre de la nouvelle dynamique impulsée par les projets internationaux comme AMMA, CORDEX et AGMIP autour des impacts se concrétisera par un saut qualitatif dans la science du WGII sur les impacts du GIEC.

Les prévisions décennales pour les impacts : Un dernier point au sujet de l'exercice CMIP5 concerne la prévisibilité décennale qui est assurément un sujet qui occupera une place importante dans le paysage scientifique tant les retombées sociétales d'une telle prévision sont importantes. Le programme CMIP proposera pour la première fois une expérience coordonnée dédiée à la prévisibilité décennale en plus des projections sur le long-terme déjà réalisées dans le cadre des exercices précédents. Cette initiative consiste en la réalisation d'une série de prévisions sur les 50 dernières années (des « hindcasts » en anglais) en initialisant les modèles de climat tous les 5 ans (1960, 1965, ... 2005) et en laissant les modèles prévoir les 10 années suivantes, puis tous les 10 ans et en laissant les modèles prévoir les 30 années suivantes. Pour chaque expérience (initialisation) un minimum de trois simulations sera réalisé pour tenir compte de la variabilité interne de l'atmosphère. Cela représente un gros effort de la communauté internationale, totalement nouveau, avec un fort

potentiel pour l'Afrique sub-saharienne qui connaît des variations décennales importantes de sa pluviométrie et où les retombées de telles prévisions pour des secteurs clé comme l'agriculture, l'énergie, la santé publique pourraient être cruciales. Cependant bien que des expériences préliminaires ont d'ores et déjà montré des résultats prometteurs (Smith et al. 2007 ; Keenlyside et al. 2008), ce premier exercice sera très certainement plus porté sur les difficultés techniques, notamment sur l'initialisation, et sur le comportement des modèles plutôt que sur la production d'une prévision véritablement utilisable. En conséquence, il est encore à mon sens prématuré d'imaginer une application directe de ces prévisions en termes de rendement comme par exemple les coupler avec un modèle agronomique pour prévoir le rendement sur les 10 ou 30 ans à venir. Néanmoins il n'est pas prématuré d'avoir d'ores et déjà une évaluation de la qualité de cette prévision en Afrique et ce sera le sujet du postdoc d'Abdou Karim Gueye avec Serge Janicot au LOCEAN, en plus d'une réflexion sur le potentiel de cette prévision en termes d'adaptation aux variations et au changement climatique.

5.2.4 Changements environnementaux et résilience des agro-systèmes

Le climat change, oui et alors ? Le défi auquel est confronté l'Afrique sub-saharienne aujourd'hui est de réduire l'insécurité alimentaire et la pauvreté des populations rurales dans un contexte de forte augmentation démographique et de grande variabilité climatique qui pourrait s'accroître dans le futur sous l'effet du changement global. Ce défi est loin d'être inatteignable. L'Afrique, qui n'a pas encore réalisé sa révolution verte comme les pays industrialisés ou même plus récemment les pays de l'Asie du Sud-Est, dispose plus que nulle part au monde d'un incroyable potentiel pour accroître sa productivité agricole. De nombreux agronomes ont montré que les rendements de mil pourraient être doublés, voire triplés en apportant des fertilisants (McIntire et al. 1989 ; Powell and Fussell 1993 ; Shapiro and Sanders 1998). Bationo et al. (1993 ; 2007) ont montré que les rendements de sorgho et de mil pourraient être multipliés jusqu'à dix passant de 0.2 t/ha à 2 t/ha en combinant à la fois la fertilisation organique (les résidus de culture), la fertilisation minérale (en particulier le phosphate) et une densité de semis accrue. A titre de comparaison, les agriculteurs des pays asiatiques utilisent dix fois plus de fertilisants que ceux de l'Afrique sub-saharienne (Van der Zaag 2009 ; FAO 2008). Fort de ce constat, on peut se demander si l'angle de la variabilité et du changement climatique est la bonne entrée pour aborder les changements à venir pour l'agriculture africaine. La comparaison entre l'impact faiblement négatif et incertain du changement climatique sur les rendements (une baisse de -20% de rendement comme j'ai pu le montrer dans mes travaux) semble effectivement très faible comparativement à une augmentation des rendements par deux ou trois avec le progrès technique. Ne doit-on donc pas se focaliser plutôt sur ces aspects techniques (apports massifs d'intrants et d'herbicides, sélection et adoption de variétés plus productives, augmentation de la densité cultivée pour passer d'une agriculture extensive à une agriculture intensive) pour mener cette révolution verte comme préconisé notamment par l'Alliance pour une Révolution Verte en Afrique (AGRA ; Alliance for a Green Revolution in Africa) financée par la fondation Rockefeller et la Bill & Melinda Gates fondation ? Cette question n'est pas nouvelle et force est de constater que les 40 années de recherche agronomique autour de ces solutions techniques se sont soldées par un échec s'il l'on en juge par la très faible adoption de ces techniques par les agriculteurs du Sahel (de Rouw 2003). Si une partie de cet échec est due à des facteurs économiques (faiblesse du marché et désinvestissement massif de l'état en conséquences des plans d'ajustement structurel imposé par le FMI et la Banque Mondiale), la forte variabilité temporelle et spatiale des pluies à laquelle les agriculteurs font face en est également une des causes (de Rouw 2003 ; Barbier et al. 2008) pour au moins deux raisons :

- Le bénéfice de l'utilisation des fertilisants sur les rendements est très faible en cas de mauvaise pluviométrie et une année très sèche entrainera la perte des récoltes et donc la perte de l'argent investi sur la culture. L'incertitude sur la pluviométrie et le risque d'une sécheresse pèsent donc sur les choix des agriculteurs qui hésitent à investir à perte. Pour les mêmes raisons, les variétés plus productives à cycle court préconisées par les agronomes n'ont pas été adoptées car plus affectées par des périodes sèches au cœur de la saison humide, ni la densification des cultures qui concentre spatialement le risque d'une sécheresse et augmente les conséquences d'une période sèche intra-saisonnière (de Rouw 2003). Lever cette incertitude sur la disponibilité en eau pourrait ainsi être un premier pas pour accompagner l'augmentation des rendements et des revenus. L'utilisation de l'information et des prévisions climatiques et le développement de stratégies agronomiques et d'investissements *ad-hoc* est une piste possible, que j'ai choisie d'explorer, même si elle n'est pas la seule (citons par exemple les techniques de rétention d'eau).
- Le climat a changé au Sahel avec une sécheresse marquée dans les années 1980 et continuera vraisemblablement de changer dans le futur dans le contexte du réchauffement climatique. Avec l'évolution des isohyètes dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, la recherche agronomique a préconisé des variétés plus courtes, sous-entendant que la longueur de la saison des pluies avait réduit. Or la longueur de la saison des pluies n'a pas varié mais c'est le risque de sécheresse au cœur de la saison qui a augmenté. Ces variétés courtes n'étaient pas donc pas les plus adaptées pour faire face à ces périodes sèches au contraire des variétés à cycle long privilégiées par les agriculteurs qui limitent les impacts de ces sécheresses intra-saisonnières (De Rouw 2003). La sélection variétale devra donc s'appuyer sur une bonne connaissance de climat actuel mais aussi de son évolution attendue dans le futur. Par exemple, l'augmentation attendue des températures et des vagues de chaleur est un élément important et complètement nouveau en Afrique qu'il faudra prendre en compte pour l'adaptation au changement climatique.

Le projet ESCAPE : C'est dans cette perspective d'explorer la piste du climat à la fois comme contrainte sur le système agro-pastoral (vulnérabilité face à la variabilité climatique et incertitudes sur les changements environnementaux) mais aussi comme opportunité pour le futur (par le biais de la prévision et des assurances sur les indices climatiques) que j'ai bâti le projet ESCAPE pour l'ANR CEP&S 2010. Ce projet financé pour la période 2011-2015 réunit 8 laboratoires français (LOCEAN, LMTG, CIRAD, LPED, OMP, CNRM, LTHE, HSM) et 9 instituts africains (AGRHYMET, CEFORP, UCAD, LPAOSF, IER, DNM Mali, AFRICARICE, ICRISAT) autour de deux objectifs principaux : (i) caractériser la vulnérabilité passée et future des sociétés rurales en Afrique aux changements environnementaux et climatiques et (ii) explorer des pistes d'adaptation pour atténuer cette vulnérabilité. Les forces du projet reposent sur un consortium très pluridisciplinaire, un lien étroit entre les partenaires du Nord et du Sud, la capitalisation de connaissances et de données de programmes préexistants, et une volonté de valorisation des résultats auprès des sociétés.

L'intégration de la dimension humaine : Ce projet vise – tout en menant une recherche spécifique sur l'évolution du climat et ses impacts sur l'agriculture – à intégrer la dimension humaine dans la problématique de la variabilité et des changements environnementaux qui était jusqu'à lors absente dans mes travaux mais aussi peu présente dans le programme international AMMA. En effet, ESCAPE ne considérera pas la variable climatique comme

seul et unique facteur de la vulnérabilité et possibilité d'adaptation qui caractérisent les sociétés sahéliennes. Les relations de l'homme à son environnement s'inscrivent dans des configurations économiques, sociales et politiques complexes qu'il est nécessaire d'interroger et de mettre en dialogue avec les phénomènes climatiques et environnementaux. A travers des études de cas au Sénégal, au Mali, au Niger et au Bénin menées par des démographes, anthropologues et historiens, le projet ESCAPE visera à :

- Etablir le rôle des changements climatiques et environnementaux dans l'évolution passée et actuelle des pratiques agropastorales, et plus largement des sociétés rurales
- Interroger la manière dont les individus et les groupes perçoivent et appréhendent la variabilité de leur environnement et comment ils intègrent cet aléas et s'y adaptent.

La mise en dialogue des sciences biophysiques (climat, hydrologie, agronomie) et des sciences humaines (démographie, histoire, anthropologie) est un défi que j'ai voulu relever dans le projet ESCAPE. Cette approche pluridisciplinaire est cruciale lorsqu'on aborde la problématique de l'adaptation aux changements environnementaux où la réponse des sociétés est enchâssée dans des transformations sociales globales. Réaliser un pont entre des communautés différentes nécessite souvent beaucoup plus de temps que la mise en œuvre d'une science mono-disciplinaire pour définir des objets d'études communs, un langage commun ou du moins compréhensible entre les différentes disciplines engagées, et des terrains communs. Un premier pas a été atteint puisqu'on a réussi à faire une proposition de projet multidisciplinaire autour d'un même questionnement. Reste maintenant à mettre en application pendant les quatre années du projet les actions transversales que l'on a proposées et à assurer la pérennité de ces approches au-delà du projet. La réflexion autour de la mise en place d'observatoires multidisciplinaires engagée notamment au sein d'AMMA et du GIS-CES et en particulier le projet pilote méthodologique d'un observatoire pluridisciplinaire des vulnérabilités des zones côtières ouest africaines face aux aléas climatiques me paraît être une piste très pertinente pour assurer cette pérennité de l'interdisciplinarité. Ce sont cependant des actions à mener sur un temps long, parfois (souvent) peu compatibles avec la logique de projets et de publications qui caractérise le mode de fonctionnement de la recherche.

Elaborer et tester des solutions pour le futur : Cette meilleure prise en compte de la dimension humaine sera un préalable à l'élaboration de solutions d'adaptation pour accroître la productivité agricole et réduire la vulnérabilité. Parmi les pistes que j'envisage dans le cadre du projet ESCAPE, je souhaiterais poursuivre l'évaluation coût/bénéfice des prévisions saisonnières et des assurances à travers deux cadres différents. Le premier cadre est la suite directe de mon travail, à savoir la construction, la calibration et l'application de modèle d'exploitation agricole qui combine les connaissances agronomiques, économiques et empiriques pour évaluer virtuellement le succès de telles mesures d'adaptation dans le contexte du climat actuel et celui du changement climatique. Le deuxième cadre est totalement nouveau puisque je souhaiterais faire intervenir cette fois les acteurs, grands absents de mon travail jusqu'à présent, dans cette évaluation à travers la mise en place d'ateliers participatifs où les producteurs seront à même de s'exprimer sur ces innovations, voire d'en proposer de nouvelles. Faire participer les acteurs dans ce processus de transfert de connaissances scientifiques vers les acteurs est très certainement un pré-requis pour l'adoption de ces mesures *in fine* pour l'aide à la décision.

Changements d'usage des terres, fertilité du sol et productivité : Evidemment, il faut avoir conscience qu'aborder la problématique de la sécurité alimentaire sous le seul angle de la variabilité climatique limite les dimensions du problème. Si la pluie joue un rôle prépondérant

pour l'agriculture, les contraintes qui déterminent une sécurité alimentaire durable sont multiples et parmi elles : (i) l'accès et gestion de l'eau, (ii) l'entretien du couvert végétal et de la fertilité des sols, (iii) et la pression et la sécurisation du foncier. La baisse de fertilité des sols qui résultent directement de la pression démographique a d'ailleurs été évoquée au même titre que la variabilité climatique comme l'une des causes possibles de la faible adoption des fertilisants par les agriculteurs sahéliens (Van der Zaag 2009) ; les fertilisants ayant que peu d'effet sur les rendements sur des sols pauvres (de Rouw 2003). Plus récemment, Gaiser et al. (2011) ont montré que l'effet induit par les changements d'usage des sols et la démographie sur la productivité des cultures sera d'une amplitude au moins égale à l'impact du changement climatique à l'échelle d'un pays africain comme le Bénin. Si dans le projet ESCAPE, on s'attachera à évaluer des produits globaux de changements d'usage des sols sur plusieurs sites où l'on dispose des données fines, il n'est cependant pas prévu d'aller jusqu'à l'impact de ces changements d'usage des sols sur la productivité, pourtant au moins aussi crucial que l'effet des changements climatiques. Cette problématique autour des changements d'usage des sols, de la productivité agricole et des changements climatiques pourrait être mise en avant à l'IPSL notamment à travers l'outil ORCHIDEE capable de rendre compte de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture, de l'effet de la modification de l'usage des sols sur la fertilité des sols et donc sur la productivité agricole mais aussi de quantifier la rétroaction de ces changements d'usage des sols sur la trajectoire du climat. Compte-tenu des changements d'usage des sols attendus dans les prochaines décennies à l'échelle planétaire et notamment l'extension des zones agricoles, la prise en compte de cette dernière rétroaction peut s'avérer essentielle pour les projections futures du climat.

6. Bibliographie

- Adefolalu D.O. (1983) Monsoon onset in West Africa application of satellite imagery. *Arch. For Meteorol. Geophys. and Bioclim.* B(23), 219-230.
- Adefolalu D.O., Senouci M., Bounoua A. and Boukri A. (1985) Mean state during the onset phase of the West African monsoon in 1979. *Arch. For Meteorol. Geophys. and Bioclim.* A(33), 327-343.
- Affholder F. (1997) Empirically modeling the interaction between intensification and climatic risk in semi-arid regions. *Field Crops Research*, 52, 79-93.
- Ainsworth, E.A., Leakey, A.D.B., Ort, D.R. and 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.
- Arnold, J. et al. (1994) *SWAT (Soil and Water Assessment Tool)*, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA, Agricultural Research Service.
- Barbier B., Yacouba H., Karambiri H., Zoromé M. and B. Somé (2008) Human Vulnerability to Climate Variability in the Sahel: Farmers' Adaptation Strategies in Northern Burkina Faso. *Environmental Management*, 10.1007/s00267-008-9237-9.
- Baron C., B. Sultan, M. Balme, B. Sarr, T. Lebel, S. Janicot and M. Dingkuhn (2005) From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact. *Phil. Trans. Roy. Soc. B*, 360 (1463), 2095-2108.
- Barrios, S., Ouattara, B. and Strobl, E. (2008) The impact of climatic change on agricultural production: Is it different for Africa? *Food Policy* 33, 287-298.
- Bationo, A., Christianson, C. and Klaij, M. (1993) The effect of crop residue and fertilizer use on pearl millet yields in Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 34(3), 251-258.
- Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B. and Kimetu, J. (2007) Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agricultural Systems*, 94(1), 13-25.
- Bazzaz F. and Sombroek W. (1996) *Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes.* John Wiley, FAO, Rome, Italy.
- Berg A., B. Sultan and N. De Noblet (2010a) Including Tropical Croplands in a Terrestrial Biosphere Model: Application to West Africa. *Climatic Change*, DOI: 10.1007/s10584-010-9874-x, Online First.
- Berg A., B. Sultan and N. De Noblet (2010b) What are the dominant features of rainfall leading to realistic large-scale crop yield simulations in West Africa? *Geophysical Research Letters*, 37, doi:10.1029/2009GL041923.
- Berg A., de Noblet-Ducoudré N., Sultan B., Lengaigne M., Guimberteau (2011) Projections of climate change impacts on potential crop productivity over tropical regions. Submitted to *Agr. For. Meteorol.*
- Berg A., P. Quirion and B. Sultan (2009) Can weather index drought insurance benefit to Least Developed Countries' farmers? A case study on Burkina Faso. *Weather, Climate and Society*, 1, 71-84.
- Bergès J.C., I. Jobard, F. Chopin and R. Roca (2009) EPSAT-SG : a satellite method for precipitation estimation; its concepts and implementation for the AMMA experiment, *Annales Geophysicae*.

- Bezançon, G., Pham, J.L., Deu, M., Vigouroux, Y., Sagnard, F., Mariac, C., Kapran, I., Manadou, A., Gérard, B., Ndjeunga, J. et al. (2009) Changes in the diversity and geographic distribution of cultivated millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br.) and sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) varieties in Niger between 1976 and 2003. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 56, 223-236.
- Biasutti, M. and Sobel, A.H. (2009) Delayed Sahel rainfall and global seasonal cycle in a warmer climate. *Geophysical Research Letters*, 36(23), L23707.
- Bondeau, A., Smith, P., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M. et al. (2007) Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology* 13(3), 679-606.
- Boote, K., Jones, J. and Hoogenboom, G. (1998) *Simulation of crop growth: CROPGRO model*, Eds. Marcel Dekker.
- Bougeault, P., Z. Toth, C. Bishop, B. Brown, D. Burridge, D. Chen, E. Ebert, M. Fuentes, T. Hamill, K. Mylne, J. Nicolau, T. Paccagnella, Y.-Y. Park, D. Parsons, B. Raoult, D. Schuster, P. Silva Dias, R. Swinbank, Y. Takeuchi, W. Tennant, L. Wilson and S. Worley (2010) The THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE). *Bull. Amer. Met. Soc.*, 91, 1059–1072.
- Boulain N., Cappelaere B., Séguis L., Favreau G., and Gignoux J. (2009) Water balance and vegetation change in the Sahel: a case study at the watershed scale with an ecohydrological model. *J. of Arid Environments*, 73, 1125-1135.
- Boulain N., Cappelaere B., Séguis L., Gignoux J. and Peugeot C. (2006) Hydrologic and land use impacts on vegetation growth and NPP at the watershed scale in a semi-arid environment. *Regional Environ. Change*, 6(3), 147-156.
- Brandt P., Caniaux G., Bourles B., Lazar A., Dengler M., Funk A., Hormann V., Giordani H., and Marin F. (2010) Equatorial upper-ocean dynamics and their interaction with the West African monsoon. *Atmospheric Science Letters*, DOI: 10.1002/asl.287
- Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M., Bouthier, A., Ripoche, D. et al. (2002), STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22(1), 69-92.
- Broutin H., Philippon S., Constantin de Magny G., Courel F., Sultan B. and Guegan J-F. (2007) Comparative study of meningitis dynamics across nine African countries: a global perspective. *Int J Health Geo*, 6:29, doi:10.1186/1476-072X-6-29.
- Brown, O. and A. Crawford. (2008) Climate change: a new threat to stability in West Africa? Evidence for Ghana and Burkina Faso. *African Security Review*, 17, 3, 39-57.
- Cadet, D. L. and Daniel, P. (1988) Long-range forecast of the break and active summer monsoons. *Tellus A*, 40A, 133–150. doi: 10.1111/j.1600-0870.1988.tb00412.x
- CGIAR – Consultative Group on International Agricultural Research (2009) *Climate, agriculture and food security: A strategy for change*. Alliance of the CGIAR Centers.
- Challinor A.J., Wheeler T.R., Craufurd P.Q., Slingo J.M. and Grimes D.I.F. (2004) Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 99-120.
- Challinor, A., Wheeler, T., Garforth, C., Craufurd, P. and Kassam, A. (2007) Assessing the vulnerability of food crop systems in Africa to climate change. *Climatic Change*, 83, 381-399.

- Challinor, A.J., J.M. Slingo, T.R. Wheeler, P.Q. Craufurd and D.I.F. Grimes (2003) Toward a combined seasonal weather and crop productivity forecasting system : determination of the working spatial scale. *J. Appl. Meteorol.*, 42, 175-192.
- Chattopadhyay, R., A.K. Sahai, and B.N. Goswami (2008) Objective Identification of Nonlinear Convectively Coupled Phases of Monsoon Intraseasonal Oscillation: Implications for Prediction. *J. Atmos. Sci.*, 65, 1549-1569.
- Chauvin F., Roehrig R., Lafore J-P. (2010) Intraseasonal variability of the Saharan heat low and its link with mid-latitudes. *J. Climate*, 23, 2544–2561.
- Chippaux J-P and Chabalier F. (2000) Niger : une épidémie de méningite dévastatrice. *Sciences au Sud*, 6, 3-3.
- Collomb, P. (1999), *Une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici a 2050*, Economica.
- Cook, K. and Vizy, E. (2006) Coupled Model Simulations of the West African Monsoon System: Twentieth- and Twenty-First-Century Simulations. *Journal of Climate* 19, 3681-3703.
- de Chabalier F., Djingarey M.H., Hassane A. and Chippaux J-P. (2000) Meningitis seasonal pattern in Africa and detection of epidemics: a retrospective study in Niger, 1990-98. *Trans R Soc Trop Med Hyg*, 94, 664-668.
- de Rouw A. (2003) Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel, *Agric. Syst.*, 81, 73-93.
- Déqué, M. (2007) Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26.
- Dhonneur G. (1985) *Traité de Météorologie tropicale*, Météo-France, 150 p.
- Diedhiou, A., Janicot, S., Viltard, A., and P. de Felice (1998) Evidence of two regimes of easterly wave over West Africa and the tropical Atlantic. *Geoph. Res. Lett.*, 25, 2805-2808.
- Diepen, C., Wolf, J., Keulen, H. and Rappoldt, C. (1989) WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management* 5(1), 16-24.
- Dilley M., Chen R.S., Deichmann U., Lerner-Lam A.L. and Arnold M. (2005) *Natural disaster hotspots: a global risk analysis*. Disaster Risk Management Series No.5. Washington, DC: The World Bank.
- Dingkuhn M. (1995) Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. 3. Characterizing environments by simulating crop phenology. *Agric. Sys.*, 48, 435-456.
- Dingkuhn M., C. Baron, V. Bonnal, F. Maraux, B. Sarr, B. Sultan, A. Clopes and F. Forest (2003) Decision-support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. *A practical guide to decision-support tools for agricultural productivity and soil fertility enhancement in sub-Saharan Africa*. Struif-Bontkes T.E and Wopereis M.C.S. (editors), IFDC, CTA, 127-139.
- Dingkuhn M., Miezán K.M. (1995) Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. II. Validation of photothermal constants and characterization of genotypes. *Agric. Syst.*, 48, 411-434.
- Dingkuhn M., Sow A., Samb A., Diack S. and Asch F. (1995) Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. 1. Photothermal and micro-climatic responses of flowering. *Agric. Sys.*, 48, 385-410.

- Douville, H. (2008) Detection-attribution of global warming at the regional scale: How to deal with precipitation variability? *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02701, doi:10.1029/2005GL024967.
- Drake J.M. (2006) Limits to Forecasting Precision for Outbreaks of Directly Transmitted Diseases, *PLoS Med* 3:e3.
- Drobinski P., B. Sultan, and S. Janicot (2005) Role of the Hoggar massif on the West African monsoon onset. *Geophysical Research Letters*, 32, doi:10.1029/2004GL020710.
- Druyan, L.M. (2010) Studies of 21st-century precipitation trends over West Africa. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.2180
- Duvel, J.P. (1990) Convection over tropical Africa and the Atlantic ocean during northern summer. Part II: Modulation by easterly waves. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1855-1868.
- EU (2007) *Adapting to climate change in Europe – options for EU action*, Green Paper From The Commission To The Council, The European Parliament, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions, SEC(2007) 849.
- FAO (2003) *The state of food insecurity in the world*. Rome, Food and Agricultural Organisation.
- FAO (2008) *The state of food insecurity in the world 2008 – high food prices and food security – threats and opportunities*. Rome, Food and Agricultural Organisation.
- Flaounas E. (2010) *Analyse du mécanisme de la mise en place de la mousson africaine: dynamique régionale ou forçage de grande échelle?* Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 168 pp.
- Foley, J., Prentice, I., Ramankutty, N., Levis, S., Pollard, D., Sitch, S. and Haxeltine, A. (1996) An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(4), 603-628.
- Folland, C.K., T.N. Palmer and D.E. Parker (1986) Sahel rainfall and worldwide sea temperature 1901-1985. *Nature*, 320, 602-607.
- Fontaine B. and Janicot S. (1993) L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*, 8, 28-53.
- Fontaine B., Louvet S., Roucou P. (2008) Definition and predictability of an OLR-based West African monsoon onset. *International Journal of Climatology*, 13, 1787–1798, DOI: 10.1002/joc.1674.
- Fontaine, B., and S. Louvet (2006) Sudan–Sahel rainfall onset: Definition of an objective index, types of years, and experimental hindcast. *J. Geophys. Res.*, 111, D20103, doi:10.1029/2005JD007019.
- Fontaine, B., Philippon, N. and P. Camberlin (1999) An improvement of June-September rainfall forecasting in the Sahel based upon region April-May moist static energy content (1968-1997). *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2041-2044.
- Gaiser T., Paeth H., Igue A.M., Judex M. and C. Hiepe (2011) Future productivity of fallow systems in Sub-Saharan Africa: Is the effect of demographic pressure and fallow reduction more significant than climate change? *Agric. For. Meteorol.*, in press.
- Gallée H., Moufouma-Okia W., Bechtold P., Brasseur O., Dupays I., Marbaix P., Messenger C., Ramel R. and T. Lebel. (2004) A high resolution simulation of a West African rainy season using a regional climate model, *J of Geophys Res*, 109 : doi 10.1029/2003JD004020.

- Gazeaux, J., E. Flaounas, P. Naveau, and A. Hannart (2011) Inferring change points and nonlinear trends in multivariate time series: Application to West African monsoon onset timings estimation, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JD014723, in press.
- Genesio L., Bacci M., Baron C., Diarra B., Di Vecchia A., Alhassane A., Hassane I., Ndiaye M., Philippon N., Tarchiani V. and S. Traoré (2011) Early warning systems for food security in West Africa: evolution, achievements and challenges. *Atmospheric Science Letters*, 12, 142–148.
- Gervois, S., de Noblet-Ducoudré, N., Viovy, N., Ciais, P., Brisson, N., Seguin, B. and Perrier, A. (2004) Including Croplands in a Global Biosphere Model: Methodology and Evaluation at Specific Sites. *Earth Interactions* 8(16), 1-25.
- Greenwood B. (1999) Manson Lecture. Meningococcal meningitis in Africa. *Trans R Soc Trop Med Hyg*, 93, 341-353.
- Greenwood B. (2006) 100 years of epidemic meningitis in West Africa – has anything changed? *Trop Med Int Health*, 11, 773-780.
- Greenwood B.M., Blakebrough I.S., Bradley A.K., Wali S. and Whittle H.C. (1984) Meningococcal disease and season in sub-Saharan Africa. *Lancet*, 1, 1339-1342.
- Guimberteau, M. (2010) *Modélisation de l'hydrologie continentale et influences de l'irrigation sur le cycle de l'eau*, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Paris.
- Haggblade S., Hazell P.B.R., Kirsten I. and Mkwandawire R. (2004) African Agriculture: Past performances, future imperatives. *International Food Policy Research Institute (IFPRI)*, 12(1).
- Hagos S.M. and Cook K.H. (2007) Dynamics of the West African monsoon jump. *J. Climate*, 20, 5264-5284.
- Hamatan, M., Mahé, G., Servat, E., Paturel, J.E., and A. Amani. (2004) Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest. *Sécheresse*, 15, 279-286.
- Hammer, G.L., Hansen, J.W., Phillips, J.G., Mjelde, J.W., Hill, H., Love, A., and A. Potgieter (2001) Advances in application of climate prediction in agriculture. *Agricultural Systems*, 70, 515-553.
- Hansen, J., Challinor, A., Ines, A., Wheeler, T. and Moron, V. (2006) Translating climate forecasts into agricultural terms: advances and challenges. *Climate Research*, 33(1), 27.
- Hansen, J.W. (2002) Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture : issues, approaches, challenges. *Agricultural Systems*, 74, 309-330.
- Hansen, J.W. and Jones, J.W. (2000) Scaling-up crop models for climatic variability applications. *Agric. Syst.*, 65, 43–72.
- Hay L.E., Wilby R.L. and G.H. Leavesley (2000) A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three Mountainous basins in the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 36, 2, 387–397.
- Herrera, E., Ouarda, T.B.M.J., Bobée, B. (2006) Méthodes de désagrégation appliquées aux modèles du climat global Atmosphère-Océan (MCGAO). *Revue des Sciences de l'eau*, 19(4): 297-312.
- Heuvelink G.B.M. (1998) Uncertainty analysis in environmental modelling under a change of spatial scale. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 50(1–3), 255–64.

- Ines A.V.M. and Hansen J.W. (2006) Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138, 44-53.
- Ingram, K.T., M.C. Roncoli, and P.H. Kirshen (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 - International Panel on Climate Change (2007) Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change in: Core Writing Team, Pachauri, R.K., Reisinger, A. (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, p. 104.
- Izumi, T., Yokozawa, M. and Nishimori, M. (2009) Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: application of a Bayesian approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(2), 333-348.
- Janicot S. and B. Sultan (2007) The large-scale context on the West African Monsoon in 2006. *CLIVAR Exchanges*, 12, 2,11-17.
- Janicot S. et B. Sultan (2001), Intra-seasonal modulation of convection in the West African monsoon, *Geophysical Research Letter*, 28, 3, 523-526
- Janicot S., A. Ali, N. Asencio, G. Berry, O. Bock, B. Bourles, G. Caniaux, F. Chauvin, A. Deme, L. Kergoat, J.-P. Lafore, C. Lavaysse, T. Lebel, B. Marticorena, F. Mounier, P. Nedelec, J.-L. Redelsperger, F. Ravegnani, C. E. Reeves, R. Roca, P. de Rosnay, H. Schlager, B. Sultan, C. Thorncroft, M. Tomasini, A. Ulanovsky and ACMAD forecasters team (2008) Large-scale overview of the summer monsoon over West and Central Africa during the AMMA field experiment in 2006. *Annales Geophysicae*, 26 (9), 2569-2595.
- Janicot, S., Caniaux, G., Chauvin, F., de Coëtlogon, G., Fontaine, B., Hall, N., Kiladis, G., Lafore, J.-P., Lavaysse, C., Lavender, S. L., Leroux, S., Marteau, R., Mounier, F., Philippon, N., Roehrig, R., Sultan, B. and Taylor, C. M. (2010a) Intraseasonal variability of the West African monsoon. *Atmospheric Science Letters*, doi: 10.1002/asl.280.
- Janicot S., F. Mounier, S. Gervois, B. Sultan, G. N. Kiladis (2010b) The dynamics of the West African Monsoon. Part V: The Detection and Role of the Dominant Modes of Convectively Coupled Equatorial Rossby Waves. *Journal of Climate*, 23, 4005-4024.
- Janicot S., Mounier F., Hall N., Leroux S., Sultan B., Kiladis G. (2009) The West African monsoon dynamics. Part IV: Analysis of 25-90-day variability of convection and the role of the Indian monsoon. *Journal of Climate*, 22, 1541–1565.
- Janicot, S., S. Trzaska and I. Pocard, 2001: Summer Sahel-ENSO teleconnection and decadal time scale SST variations. *Climate Dyn.*, 18, 303-320.
- Jobard I., F. Chopin, Bergès J.C., A. Ali, R. Roca (2009) An intercomparison of 10 days satellite products during West African Monsoon. *International Journal of Remote Sensing*.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woolen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetma, R. Reynolds, R. Jenne and D. Joseph (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 77, 437-471.
- Katz, R.W. (2002) Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies. *Clim. Res.*, 20, 167-185.

- Keating, B., Carberry, P., Hammer, G., Probert, M., Robertson, M., Holzworth, D., Huth, N., Hargreaves, J., Meinke, H., Hochman, Z. et al. (2003) An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 267-288.
- Keenlyside, N., M. Latif, J. Junclaus, L. Kornblueh and E. Rockner (2008) Advancing decadal climate scale prediction in the North Atlantic. *Nature*, 453, 84-88.
- Klopper, E., Vogel, C. and Landman, W. (2006) Seasonal Climate Forecasts – Potential Agricultural-Risk Management Tools? *Climatic Change*, 76, 73-90.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S. and Prentice, I. (2005) A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1), 1-33.
- Krysanova, V., Hattermann, F. and Wechsung, F. (2005) Development of the cohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. *Hydrological processes*, 19(3), 763-783.
- Kucharik, C. and Brye, K. (2003) IBIS yield and nitrate leaching predictions for Wisconsin maize agroecosystems receiving varied N-fertilizer. *J. Environ. Qual*, 32, 247-268.
- Lapeyssonnie L. (1963) The Meningococcal meningitis in Africa (in french). *Bull WHO*, 28-3, 114 p.
- Lavaysse C., C. Flamant, S. Janicot, D. Parker, J.-P. Lafore, B. Sultan, J. Pelon (2009) Seasonal evolution of the West African Heat Low: A climatological perspective. *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-009-0553-4.
- Lavender S.L. and A.J. Matthews (2009) Response of the West African Monsoon to the Madden–Julian Oscillation. *J. Climate*, 22, 4097–4116.
- Lebart L, Morineau A, Piron H. (1997) Statistique exploratoire multidimensionnelle. Dunod, Paris, 2ème éd., 440 p.
- Legoupil J-C., Seck S.M., Lidon B., M. Wade (2000) Professionnaliser la gestion paysanne des aménagements hydro-agricoles pour l'amélioration des performances de l'agriculture irriguée, 6^{ème} Congrès International sur la Micro-Irrigation, AFEID – Communications française pour le CEI du Cap.
- Licker, R., Johnston, M., Foley, J. A., Barford, C., Kucharik, C. J., Monfreda, C. and Ramankutty, N. (2010) Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the 'yield gap' of croplands around the world? *Global Ecology and Biogeography*, 19, 769–782. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00563.x.
- Lobell, D.B., Burke, M.B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M.D., Falcon, W.P., Naylor, R.L. (2008) Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science*, 319, 607-610.
- Lokupitiya, E., Denning, S., Paustian, K., Baker, I., Schaefer, K., Verma, S., Meyers, T., Bernacchi, C., Suyker, A. and Fischer, M. (2009) Incorporation of crop phenology in Simple Biosphere Model (SiBcrop) to improve land-atmosphere carbon exchanges from croplands. *Biogeosciences*, 6, 969–986.
- Long, S.P., Ainsworth, E.A., Leakey, A.D.B., Morgan, P.B. (2006) Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*, 312, 1918-1921.
- Mariac C., Jehin L., Saïdou A.A., Thuillet A.C., Couderc M., Sire S., Jugdé H., Adam H., Bezançon G., Pham J-L., Vigouroux Y. (2011) Genetic basis of pearl millet population

- adaptation along an environmental gradient investigated by a combination of genome scan and association mapping. *Mol Ecol.*, 20, 81-91.
- Marteau R., Moron V., Philippon N. (2008) Spatial coherence of monsoon onset over Western and Central Sahel (1950–2000). *Journal of Climate* 22, 1331–1342.
- Marteau R., Sultan B., Moron V., Alhassane A., Baron C. and S.B. Traoré (2011) The onset of the rainy season and farmers' sowing strategy for pearl millet cultivation in Southwest Niger, *Agr. For. Meteorol.*, in revision.
- Mathon, V. and H. Laurent (2001) Life cycle of Sahelian mesoscale convective cloud systems. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 127, 377-406.
- Matthews A.J. (2004) Intraseasonal variability over tropical Africa during northern summer. *Journal of Climate* 17, 2427–2440.
- McIntire, J., Hopkins, J., Lamers, J. and Fussell, L.K. (1989) *The Millet System of Western Niger. I. Crop Production*. International Livestock Center for Africa (ILCA), Addis Ababa, Ethiopia.
- Meza, F.J., Hansen, J.W., and D. Osgood (2008) Economic Value of Seasonal Climate Forecasts for Agriculture: Review of Ex-Ante Assessments and Recommendations for Future Research. *J. App. Meteorol.*, 47, 1269-1286.
- Michelangeli P.-A., Vrac M., Loukos H. (2009) Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions. *Geophysical Research Letters*, 36, L11708, doi:10.1029/2009GL038401, 2009.
- Molesworth A., Cuevas L., Morse A.P., Herman J.R. and Thomson M.C. (2002) Dust clouds implicated in spread of infection. *The Lancet (Letter)*, 359 (9300), 81-82.
- Molesworth A.M., Cuevas L.E., Connor S.J., Morse A.P. and Thomson M.C. (2003) Environmental Risk and Meningitis Epidemics in Africa. *CDC publications* 9 (10).
- Molesworth A.M., Thomson M.C., Connor S.J., Cresswell M.C., Morse A.P., Shears P., Hart C.A. and Cuevas L.E. (2002) Where is the Meningitis Belt? *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 96, 242-249.
- Mounier F., Janicot S., Kiladis G.N. (2008) The West African monsoon dynamics. Part III: The quasi-biweekly zonal dipole. *Journal of Climate*, 21, 1911–1928.
- Mounier, F. and Janicot, S. (2004) Evidence of two independent modes of convection at intraseasonal timescale in the West African monsoon. *Geophysical Research Letters*, 31, L16116, doi:10.1029/2004GL020665.
- Ngo-Duc, T., J. Polcher, K. Laval (2005) A 53-year forcing data set for land surface models. *J. Geophys. Res.*, 110, DO6116. doi:10.1029/2004JD005434.
- Oettli P., Sultan B., Baron C. and M. Vrac (2011) Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa? *Environn. Res. Lett.*, 6 014008 doi: 10.1088/1748-9326/6/1/014008.
- Ogallo, L.A., Boulahya, M.S., and T. Keane (2000) Applications of seasonal to interannual climate prediction in agricultural planning and operations. *Agric. For. Meteorol.*, 103, 159-166.
- Omotosho B.J. Long-range prediction of the onset and the end of the rainy season in West Africa (1992) *Int. J. of Climatology*, 12, 369-392.

- Oram, P.A. (1989) Sensitivity of agricultural production to climatic change, an update. In : *Climate and Food Security*. IRRI, Manila, The Philippines, 25-44.
- Osborne, T., Lawrence, D., Challinor, A., Slingo, J. and Wheeler, T. (2007) Development and assessment of a coupled crop–climate model. *Global Change Biology* 13(1), 169-183.
- Palmer, T.N., et al., (2004) Development of a European multi-model ensemble system for seasonal to inter-annual prediction (DEMETER). *Bull. of the Am. Meteorol. Soc.*, 85, 853-872
- Parker, D.J., R.R. Burton, A. Diongue-Niang et al. (2005) The diurnal cycle of the West African monsoon circulation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2839-2860.
- Patricola, C.M. and K.H. Cook (2010) 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.
- Peyrille P., Lafore J-P. (2007) An idealized two-dimensional framework to study the West African monsoon, part ii: large scale advection and the diurnal cycle. *J Atmos Sci*, 64, 2783–2803
- PNUD (2004) *Reducing disaster risk: a challenge for development*. UNDP global report (ed. M. Pelling).
- Pohl B., J. Crétat and P. Camberlin (2011) Testing WRF capability in simulating the atmospheric water cycle over Equatorial East Africa. *Climate Dynamics*, published on line. doi:10.1007/s00382-011-1024-2.
- Powell, J.M. and Fussell, L.K. (1993) Nutrient and structural carbohydrate partitioning in pearl millet. *Agronomy Journal*, 85, 862–866.
- Puma, M. and Cook, B. (2010) Effects of irrigation on global climate during the 20th century. *Journal of Geophysical Research* 115(D16), D16120.
- Ramel R., Galle H. and Messenger C. (2006) On the northward shift of the west African monsoon. *Climate Dynamics*, 26, 429–440.
- Redelsperger, J.-L., Thorncroft, C. D., Diedhiou, A., Lebel, T., Parker, D. J. and Polcher, J. (2006) African Monsoon Multidisciplinary Analysis: An International Research Project and Field Campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87, 1739–1746.
- Richman M.B. (1986) Rotation on principal components. *J Climatol*, 6, 293-335.
- Ritchie, J. et al. (1985) Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model, *ARS-United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USA)*.
- Roudier P., Sultan B., Quirion P., Baron C., Alhassane A., Traoré S. and B. Muller (2011a) An ex-ante evaluation of seasonal forecasting for millet growers in SW Niger. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.2308.
- Roudier P., Sultan B., Quirion P., Berg A. (2011b) The impact of future climate change on West African agriculture: what does the recent literature say? *Global Environmental Change*, doi:10.1016/j.gloenvcha.2011.04.007.
- Sacks, W., Cook, B., Buening, N., Levis, S. and Helkowski, J. (2009) Effects of global irrigation on the near-surface climate. *Climate dynamics*, 33(2), 159-175.
- 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*. CILSS, Niamey, Niger.

- Samba, A., Sarr, B., Baron, C., Gozé, E., Maraux, F., Clerget, B. and Dingkuhn, M. (2001) *La prévision agricole à l'échelle du Sahel, Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision*. Montpellier: Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), Institut national de la recherche agronomique (Inra), 243-262.
- Schlenker, W., Lobell, D.B. (2010) Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, 5, 1-8.
- Scholze M., Bondeau A., Ewert F., Kucharik C., Priess J. and Smith P. (2005) Advances in large scale crop modelling. *EOS*, 86, 245-247.
- Sellers, P., Dickinson, R., Randall, D., Betts, A., Hall, F., Berry, J., Collatz, G., Denning, A., Mooney, H., Nobre, C. et al. (1997) Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 275(5299), 502.
- Severino J-M. and Ray O. (2010) *Le temps de l'Afrique*. Odile Jacob, 345 pp.
- Shapiro, B.I., Sanders, J.H., Reddy, K.C. and Baker, T.G. (1993) Evaluating and adapting new technologies in a high-risk agricultural system – Niger. *Agricultural Systems*, 42, 153-171.
- Sijikumar S., Roucou P., Fontaine B. (2006) Monsoon onset over Sudan-Sahel: simulation by the regional scale model MM5. *Geophys Res Lett*, 33, doi:[10.1029/2005GL024819](https://doi.org/10.1029/2005GL024819)
- Sitch S. et al. (2003) Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Glob Chang Biol*, 9, 161–185
- Skees J.R., Hazell P. and Miranda M. (1999) New approaches to Crop Yield insurance in developing countries. *EPTD Discussion Paper No. 55*.
- Smith, .M. et al. (2007) Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model. *Science*, 317, 796-799.
- Smith, J.B., Huq, S., Lenhart, S., Mata, L.J., Nemesova, I., Toure, S. (1996) *Vulnerability and Adaptation to Climate Change: Interim Results from the U.S. Country Studies Program*. Kluwer Academic Publishers.
- Smith, P., Ciais, P., Peylin, P., De Noblet-Ducoudré, N., Viovy, N., Meurdesoif, Y. and Bondeau, A. (2010) European-wide simulations of croplands using an improved terrestrial biosphere model: 2. Interannual yields and anomalous CO₂ fluxes in 2003. *Journal of Geophysical Research*, 115(G4), G04028.
- Snell S.E., Gopal S., Kaufmann R.K. (2000) Spatial Interpolation of Surface Air Temperatures Using Artificial Neural Networks: Evaluating Their Use for Downscaling GCMs. *J Climate*, 13, 886–895.
- Sultan B. and S. Janicot (2000) Abrupt Shift of the ITCZ over West Africa and Intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letter*, 27, 20, 3353-3356.
- Sultan B. and S. Janicot (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. et S. Janicot (2004) La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles intra-saisonnières. 1ère partie : Analyse diagnostique de la mise en place de la mousson et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. *Sécheresse*, 15(4), 321-330.
- Sultan B., B. Barbier, J. Fortilus, S.M. Mbaye and G. Leclerc (2010) Estimating the potential economic value of the seasonal forecasts in West Africa: a long-term ex-ante assessment in Senegal. *Weather, Climate and Society*, 2, 69–87.

- Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn, B. Saar and S. Janicot (2005a) Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128 (1-2), 93-110.
- Sultan B., K. Labadi, G. Beltrando et S. Janicot (2004) L'épidémie de méningite au Mali et la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest. *Environnement, Risques et Santé*, 3, 1, 23-34.
- Sultan B., K. Labadi, J.F. Guégan et S. Janicot (2005b) Climate drives the meningitis onset in West Africa. *Plos-Medicine*, 2(1):e6.
- Sultan B., S. Janicot and C. Correia (2009a) Medium lead-time predictability of intraseasonal variability of rainfall in West Africa. *Weather and Forecasting*, 24, 767–784.
- Sultan B., M. Bella-Medjo, A. Berg, P. Quirion and S. Janicot (2009b) Multi-scales and multi-sites analysis of the role of climate in cotton yields in West Africa. *International Journal of Climatology*, DOI 10.1002/joc.1872.
- Sultan B., S. Janicot, and A. Diedhiou (2003), The West African monsoon dynamics, Part I : Documentation of intra-seasonal variability. *Journal of Climate*, 16, 3389-3406.
- Sultan B., S. Janicot, C. Baron, M. Dingkuhn, B. Muller, S. Traoré and B. Sarr (2008) Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest : une illustration des problèmes majeurs. *Sécheresse*, 19(1).
- Sultan B., S. Janicot, et P. Drobinski (2007) Characterization of the diurnal cycle of the West African monsoon around the monsoon onset. *Journal of Climate*, 20 (15), 4014-4032.
- Taylor C.M. (2008) Intraseasonal land-atmosphere coupling in the West African monsoon. *Journal of Climate*, 21, 6636–6648.
- Taylor C.M., Parker D.J., Kalthoff N., Gaertner M.A., Philippon N., Bastin S., Harris P.P., Boone A., Guichard F., Agusti-Panareda A., Baldi M., Cerlini P., Descroix L., Douville H., Flamant C., Grandpeix J-Y., Polcher J. (2010) New perspectives on land-atmosphere feedbacks from the African Monsoon Multidisciplinary Analyses (AMMA). *Atmospheric Science Letters* in press.
- Thomson M.C., Molesworth A.M., Djingarey M.H., Yameogo K.R., Belanger F. and Cuevas L.E. (2006) Potential of environmental models to predict meningitis epidemics in Africa. *Trop Med Int Health*, 11, 781-788.
- Thornton, P. K. (2006) Ex ante impact assessment and seasonal climate forecasts: Status and issues. *Climate Res.*, 33, 55–65.
- Tikhomirov E., Santamaria M., Esteves K. (1997) Meningococcal disease: public health burden and control. *Rapp Trimest Stat Sant Mond*, 50, 170-177.
- Traoré, S. B., Alhassane, A., Muller, B., Kouressy, M., Somé, L., Sultan, B., Oettli, P., Siéné L., Ambroise C., Sangaré, S., Vaksmann, M., Diop, M., Dingkhun, M., Baron, C. (2010) Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. *Atmospheric Science Letter*, 1530-261X, <http://dx.doi.org/10.1002/asl.295>, 10.1002/asl.295.
- Trotter C.L. and Greenwood B.M. (2007) Meningococcal carriage in the African meningitis belt. *Lancet Infect Dis*, 7, 797-803.
- Tubiello, F.N., Soussana, J.F., Howden, M. (2007) Crop and pasture response to climate change. *PNAS*, 104, 19686-19690.

- Van der Linden P. and Mitchell J.F.B. (2009) *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project*, 160 pp., Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK.
- Van der Zaag, P. (2010) Viewpoint – 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(1), 154-160.
- Von Storch H. (1995) Inconsistencies at the interface of climate impact studies and global climate research. *Meteorol Zeitschrift*, 4 NF, 72-80.
- Ward, M.N. (1998) Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical north Africa at interannual and multidecadal timescales. *J. Climate*, 11, 3167-3191.
- Ward, N., Cook, K., Diedhiou, A., Fontaine, B., Giannini, A., Kamga, A., Lamb, P.J., Ben Mohamed, A., Nassor, A., and C. Thorncroft (2004) Seasonal-to-Decadal Predictability and Prediction of West African Climate. *CLIVAR Exchanges*, 9, 3, 14-20
- WHO (2000) *Report on Global Surveillance of Epidemic-prone Infectious Disease*. WHO/CDS/CSR/ISR/2000.1. 127 p.
- WHO (2003) Meningococcal meningitis. *Fact Sheet 2003* ; 141.
- Wilks D.S., Wilby R.L. (1999) The weather generation game: A review of stochastic weather models. *Prog Phys Geogr*, 23, 329-357.
- Williams, J.R., C.A. Jones, and P.T. Dyke (1984) A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transamerican Society of Agricultural Engineering*, 27, 129-144.
- Xavier, P.K., and B.N. Goswami (2007) Analog method for real time forecasting of summer monsoon subseasonal variability. *Mon. Wea. Rev.* 135, 4149-4160.
- Xie P., and P. A. Arkin (1996) Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2539-2558.
- Yaka P., B. Sultan, H. Broutin, S. Janicot, S. Philippon and N. Fourquet (2008) Relationships between climate and year-to-year variability in meningitis outbreaks: a case study in Burkina Faso and Niger. *International Journal of Health Geographics*, 7, 34. doi :10.1186/1476-072X-7-34.
- Zorita E. and Von Storch H. (1999) The analog method - a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *J Climate*, 12, 2474-2489.

7. Titres et travaux

7.1 Publications dans des revues internationales à comité de lecture

Publication de rang A

1. **Marteau, R., Sultan, B., Baron, C., Moron V., Traoré, S.B., and Alhassane, A.** (2011) The onset of the rainy season and the farmer's sowing strategy for pearl millet cultivation in Southwest Niger, *Agricultural and Forest Meteorology*, sous presse.
2. **Berg A., de Noblet-Ducoudré N., Sultan B., Lengaigne M. and M. Guimberteau** (2011) Projections of climate change impacts on potential crop productivity over tropical regions, *Agricultural and Forest Meteorology*, en révision.
3. **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*, doi:10.1016/j.gloenvcha.2011.04.007.
4. **Roudier P., Sultan B., Quirion P., Baron C., Alhassane A., Traoré S. and B. Muller** (2011) An ex-ante evaluation of seasonal forecasting for millet growers in SW Niger, *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.2308.
5. **Oettli P., Sultan B., Baron C. and Vrac M.** (2011) Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa?, *Environmental Research Letter*, 6 (2011) 014008.
6. **Traoré, S. B., Alhassane, A., Muller, B., Kouressy, M., Somé, L., Sultan, B., Oettli, P., Siéné L., Ambroise C., Sangaré, S., Vaksman, M., Diop, M., Dingkhun, M., Baron, C.** (2010) Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa, *Atmospheric Science Letter*, 1530-261X, <http://dx.doi.org/10.1002/asl.295>, 10.1002/asl.295.
7. **Janicot, S., Caniaux, G., Chauvin, F., de Coëtlogon, G., Fontaine, B., Hall, N., Kiladis, G., Lafore, J.-P., Lavaysse, C., Lavender, S. L., Leroux, S., Marteau, R., Mounier, F., Philippon, N., Roehrig, R., Sultan, B. and Taylor, C. M.** (2010), Intraseasonal variability of the West African monsoon. *Atmospheric Science Letters*, doi: 10.1002/asl.280.
8. **Janicot S., F. Mounier, S. Gervois, B. Sultan, G. N. Kiladis** (2010) The dynamics of the West African Monsoon. Part V: The Detection and Role of the Dominant Modes of Convectively Coupled Equatorial Rossby Waves. *Journal of Climate*, 23, 4005-4024.
9. **Berg A., B. Sultan and N. De Noblet** (2010) Including Tropical Croplands in a Terrestrial Biosphere Model: Application to West Africa, *Climatic Change*, DOI: 10.1007/s10584-010-9874-x, Online First.
10. **Berg A., B. Sultan and N. De Noblet** (2010) What are the dominant features of rainfall leading to realistic large-scale crop yield simulations in West Africa?, *Geophysical Research Letters*, 37, doi:10.1029/2009GL041923.
11. **Rust H., Vrac M., Lengaigne M. and B. Sultan** (2010) Quantifying differences in circulation patterns based on probabilistic models: IPCC-AR4 multi-model comparison for the North Atlantic. *Journal of Climate*, 23, 6573-6589, doi: 10.1175/2010JCLI3432.1.
12. **Gueye A.K., Janicot S., Niang A., Swadogo S., Sultan B., Diongue-Niang A. And Thiria S.** (2010) Weather regimes over Senegal during the summer monsoon season with Self-Organizing Maps. Part I: Synoptic time scale, *Climate Dynamics*, DOI: 10.1007/s00382-010-0782-6, Online First.
13. **Sultan B., B. Barbier, J. Fortilus, S.M. Mbaye and G. Leclerc** (2010) Estimating the potential economic value of the seasonal forecasts in West Africa: a long-term ex-ante assessment in Senegal, *Weather, Climate and Society*, 2, 69–87.
14. **Berg A., P. Quirion and B. Sultan** (2009) Can weather index drought insurance benefit to Least Developed Countries' farmers? A case study on Burkina Faso, *Weather, Climate and Society*, 1,

15. **Janicot S., F. Mounier, N. Hall, S. Leroux, B. Sultan and G. Kiladis** (2009) Dynamics of the west african monsoon. Part IV : analysis of 25-90-day variability of convection and the role of the indian monsoon, *Journal of Climate*, 22, 1541-1565.
16. **Lavaysse C., C. Flamant, S. Janicot, D. Parker, J.-P. Lafore, B. Sultan, J. Pelon** (2009) Seasonal evolution of the West African Heat Low: A climatological perspective, *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-009-0553-4.
17. **Sultan B., M. Bella-Medjo, A. Berg, P. Quirion and S. Janicot** (2009) Multi-scales and multi-sites analysis of the role of climate in cotton yields in West Africa, *International Journal of Climatology*, DOI 10.1002/joc.1872.
18. **Sultan B., S. Janicot and C. Correia** (2009) Medium lead-time predictability of intraseasonal variability of rainfall in West Africa, *Weather and Forecasting*, 24, 767–784.
19. **Drobinski P., Bastin S., Janicot S., Bock O., Dabas A., Delville P., Reitebuch O. and B. Sultan** (2009) On the late northward propagation of the West African monsoon in summer 2006 in the region of Niger/Mali, *Journal of Geophysical Research*, 114, D09108, doi:10.1029/2008JD011159.
20. **Risi C., Bony S., Vimeux Françoise, Descroix Luc, Ibrahim B., Lebreton E., Mamadou I. and B. Sultan** (2008) What controls the isotopic composition of the African monsoon precipitation ? Insights from event-based precipitation collected during the 2006 AMMA field campaign. *Geophysical Research Letters*, 35 (24), L24808.
21. **Janicot S., A. Ali, N. Asencio, G. Berry, O. Bock, B. Bourles, G. Caniaux, F. Chauvin, A. Deme, L. Kergoat, J.-P. Lafore, C. Lavaysse, T. Lebel, B. Marticorena, F. Mounier, P. Nedelec, J.-L. Redelsperger, F. Ravegnani, C. E. Reeves, R. Roca, P. de Rosnay, H. Schlager, B. Sultan, C. Thorncroft, M. Tomasini, A. Ulanovsky and ACMAD forecasters team** (2008) Large-scale overview of the summer monsoon over West and Central Africa during the AMMA field experiment in 2006, *Annales Geophysicae*, 26 (9), 2569-2595.
22. **Yaka P., B. Sultan, H. Broutin, S. Janicot, S. Philippon and N. Fourquet** (2008) Relationships between climate and year-to-year variability in meningitis outbreaks: a case study in Burkina Faso and Niger, *International Journal of Health Geographics*, 7 : 34. Doi :10.1186/1476-072X-7-34.
23. **Philippon S., Broutin H., Constantin de Magny G., Touré , Diakité, Fourquet, Courel M.F., Sultan B., Guégan J.F.** Spatial dynamics of meningitis in Mali: long-term study of persistence and spread (2008) *International Journal of Epidemiology*, 13(1):103-9. Epub 2008 Jul 31.
24. **Broutin H., Philippon S., Constantin de Magny G., Sultan B., Guégan J.F.** (2007) Comparative study of meningitis dynamics across 9 African countries: a global perspective, *International Journal of Health Geographics*, 6(1), 29-37.
25. **Bock O., F. Guichard, S. Janicot, J.P. Lafore, M.N. Bouin and B. Sultan** (2007) Multiscale analysis of precipitable water vapor over Africa from GPS data and ECMWF analyses, *Geophysical Research Letters*, 34 (9), L09705, doi:10.1029/2006GL028039.
26. **Sultan B., S. Janicot, et P Drobinski** (2007) Characterization of the diurnal cycle of the West African monsoon around the monsoon onset, *Journal of Climate*, 20 (15), 4014-4032.
27. **Gunnell Y., K. Anupama and B. Sultan** (2007). Response of the South Indian runoff-harvesting civilization to northeast monsoon rainfall variability during the last 2000 years: instrumental records and indirect evidence, *The Holocene*, 17(2), 207-215.
28. **Dingkuhn M., B.B. Singh, B. Clerget, J. Chantereau and B. Sultan** (2006). Past, present and future criteria to breed crops for water-limited environments in West Africa, *Agricultural Water Management*, 80 (1-3), 241-261.
29. **Baron C., B. Sultan, M. Balme, B. Sarr, T. Lebel, S. Janicot and M. Dingkuhn** (2005). From

GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact, *Phil. Trans. Roy. Soc. B*, 360 (1463), 2095-2108.

30. **Sultan B., K. Labadi, J.F. Guégan et S. Janicot** (2005). Climate drives the meningitis onset in West Africa, *Plos-Medicine*, 2(1):e6.
31. **Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn, B. Saar et S. Janicot** (2005). Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon, *Agricultural and Forest Meteorology*, 128 (1-2), 93-110.
32. **Drobinski P., B. Sultan, et S. Janicot** (2005). Role of the Hoggar massif on the West African monsoon onset, *Geophysical Research Letters*, 32, doi:10.1029/2004GL020710.
33. **Sultan B. et S. Janicot** (2003), The West African monsoon dynamics, Part II : The “pre-onset” and the “onset” of the summer monsoon, *Journal of Climate*, 16, 3407-3427.
34. **Sultan B., S. Janicot, et A. Diedhiou** (2003), The West African monsoon dynamics, Part I : Documentation of intra-seasonal variability, *Journal of Climate*, 16, 3389-3406.
35. **Janicot S. et B. Sultan** (2001), Intra-seasonal modulation of convection in the West African monsoon, *Geophysical Research Letter*, 28, 3, 523-526
36. **Sultan B. et S. Janicot** (2000), Abrupt Shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability, *Geophysical Research Letter*, 27, 20, 3353-3356.

Publications de rang B

1. **Sultan B., S. Janicot, C. Baron, M. Dingkuhn, B. Muller, S. Traoré and B. Sarr** (2008) Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l’Ouest : une illustration des problèmes majeurs, *Sécheresse*, 19(1).
2. **Martiny N., I. Chiapello, B. Sultan et B. Fontaine** (2007) Les aérosols désertiques, un facteur potentiel des épidémies de méningite en Afrique de l’Ouest, *Santé-Décision-Management*, 10. 31–39.
3. **Redelsperger J.L., A. Diedhiou, C. Flamant, S. Janicot, J.P. Lafore, T. Lebel, J. Polcher, B. Bourles, G. Caniaux, P. de Rosnay, M. Desbois, L. Eymard, B. Fontaine, K. Ginoux, M. Hoepffner, C. Kane, K. Law, C. Mari, B. Marticorena, E. Mougin, J. Pelon, C. Peugeot, A. Protat, F. Roux, B. Sultan et E. Van Den Akker** (2006), AMMA : le projet international d’étude de la mousson africaine et de ses impacts. *La Météorologie*, 54, 22-32.
4. **Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn et S. Janicot** (2005), La variabilité climatique en Afrique de l’Ouest aux échelles intra-saisonnières. 2ème partie : Applications à la sensibilité des rendements agricoles au Sahel, *Sécheresse*, 16(1), 23-33.
5. **Sultan B. et S. Janicot** (2004), La variabilité climatique en Afrique de l’Ouest aux échelles intra-saisonnières. 1ère partie : Analyse diagnostique de la mise en place de la mousson et de la variabilité intra-saisonnière de la convection, *Sécheresse*, 15(4), 321-330.
6. **Sultan B., K. Labadi, G. Beltrando et S. Janicot** (2004) L’épidémie de méningite au Mali et la circulation atmosphérique en Afrique de l’Ouest. *Environnement, Risques et Santé*, 3, 1, 23-34.
7. **Sultan B., E. Servat, J. Maley et G. Mahé** (2001), Interrelations entre les forêts tropicales et la variabilité climatique : une synthèse des études récentes, *Sécheresse*, 4, 12, 221-229.

7.2 Autres publications

Publications dans des revues sans comité de lecture

1. **Janicot S. and B. Sultan** (2007), The large-scale context on the West African Monsoon in 2006, *CLIVAR Exchanges*, 12, 2,11-17.
2. **Sultan B. et S. Janicot** (2006) [Climate and agriculture in West Africa](#), *Geoconnexion Int. Mag.*, vol.5, issue 7, 50-51.

3. **Sultan B.** (2005), Influence du climat sur la survenue des épidémies de méningite en Afrique de l'Ouest, *Médecine / Science*, 5, vol.1, 470-471.
4. **Sultan B. et S. Janicot** (2003), The “pre-onset” and the “onset” of the monsoon system over West Africa, *CLIVAR Exchanges*, 27, vol.8, 2-3, 22-24 .
5. **Sultan B. et S. Janicot** (2003), Evidence of enhanced and weakened monsoon phases over West Africa, *CLIVAR Exchanges*, 27, vol.8, 2-3: http://www.clivar.org/publications/exchanges/ex27/ex27_cont.htm

Publications dans des ouvrages collectifs

1. **Dingkuhn M., C. Baron, V. Bonnal, F. Maraux, B. Sarr, B. Sultan, A. Clopes et F. Forest** (2003). Decision-support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. *A practical guide to decision-support tools for agricultural productivity and soil fertility enhancement in sub-Saharan Africa*. Struif-Bontkes T.E and Wopereis M.C.S. (editors), IFDC, CTA, 127-139.

7.3 Communications lors de conférences et congrès internationaux

Communications internationales orales avec actes

Marteau, R., Sultan, B., Moron V., Baron, C., Traoré, S.B., and Alhassane, A. (2010) : Démarrage de la saison des pluies et date de semis du mil dans le sud-ouest du Niger. *Actes du XXIIIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Risques et changements climatiques*, Rennes (France), 379-384.

Berg A., P. Quirion and B. Sultan (2008) Can weather index drought insurance benefit to Least Developed Countries' farmers? A case study on Burkina Faso, *AFSE Meeting, Frontiers in Environmental Economics and Natural Resources Management*, Toulouse, 9-11 Juin 2008.

Sultan B., S. Janicot, et P Drobinski (2007) Characterization of the diurnal cycle of the West African monsoon around the monsoon onset, *19th Conference on Climate Variability and Change*, AMS, Abstract 4B.2, 16 Jan 2007, San Antonio, Texas.

Sultan B., S. Janicot, A. Lazar and C. Menkes (2005), The atmospheric dynamics of the West African monsoon onset and its ocean counterpart, *First International AMMA Conference*, 28 Nov. – 2 Dec. 2005, Dakar, Senegal.

Yaka P., B. Sultan, S. Janicot, Fourquet N., Philippon S., Courel M.F., Legrand M. and Chiapello I., (2005), Prévision des épidémies de méningite en Afrique Sahélienne à partir de la dynamique atmosphérique, *First International AMMA Conference*, 28 Nov. – 2 Dec. 2005, Dakar, Senegal.

Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn et S. Janicot (2004), Agricultural impacts of regional variability of the West African monsoon, *4th International Crop Science Congress (4ICSC)*, 26 Sep - 1 Oct 2004, Brisbane, Australie.

Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn et S. Janicot (2003), Applications agronomiques de l'étude de la dynamique régionale de la mousson en Afrique de l'Ouest, *Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère (AMA)*, 3-5 décembre 2003, Centre International de Conférence, Météo-France, Toulouse, 53-55.

Baron C., M. Balme, B. Sultan et M. Dingkuhn (2003), Variabilités climatiques et impacts agricoles : peut-on transcender les échelles ?, *Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère (AMA)*, 3-5 décembre 2003, Centre International de Conférence, Météo-France, Toulouse, 57-57.

Sultan B. et S. Janicot (2003), La mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest, *XVI Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*, 10-13 septembre 2003, Varsovie, Pologne, Dokumentacja Geograficzna 29, 317-320.

Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn et S. Janicot (2003), Applications agronomiques de l'étude de la dynamique régionale de la mousson en Afrique de l'Ouest, *XVI Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*, 10-13 septembre 2003, Varsovie, Pologne, Dokumentacja Geograficzna 29, 321-324.

Janicot S. et B. Sultan (2002), The role of the intra-seasonal time-scale variability in the West African monsoon, *25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 29 April - 3 May 2002, San Diego, Californie.

Janicot S. et B. Sultan (2000), The West African monsoon onset and intra-seasonal variability, *24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology & 10th Conference on Interaction of the Sea and Atmosphere*, 29 May - 2 June 2000, 11.B1, 364-365, AMS, Ft. Lauderdale, Floride.

Communications internationales orales sans actes

Sultan B. (2011) The ESCAPE programme: an inter-disciplinary study on vulnerability, resilience and adaptation of rural societies to environmental changes in Africa, invited speaker, *1st Africa College International Conference: Food security, Health and Impact Knowledge Brokering*, 22nd - 24th June 2011, Devonshire Hall, University of Leeds, UK.

Gueye, A. K., Janicot, S., Niang, A., Sawadogo, S., Sultan, B., Diongue-Niang, A. & Thiria, S. (2009) Synoptic climatology over Senegal during the summer monsoon season with Self-Organizing Maps. *Third International AMMA Conference*, July 20—24, at Ouagadougou, Burkina Faso.

Roudier, P., Quirion, P. & Sultan, B. (2009) How can seasonal climate forecasts change agricultural decisions? A case study on millet producers in Niger. *Third International AMMA Conference*, July 20—24, at Ouagadougou, Burkina Faso.

Martiny, N., Chiapello, I., Jeanne, I., Marticorena, B., Sultan, B. & Fontaine, B. (2009) Advances in the analyses of the dust/climate and meningitis relationships based on a multidisciplinary approach, as part of the French AMMA programme. *Third International AMMA Conference*, July 20—24, at Ouagadougou, Burkina Faso.

Sultan, B. & Janicot, S. (2009) Medium lead-time predictability of intraseasonal variability of rainfall in West Africa. *Third International AMMA Conference*, July 20—24, at Ouagadougou, Burkina Faso.

Sultan, B., Alhassane, A., Traoré, S. B., Baron, C., Muller, B., Roudier, P., Marteau, R., Descroix, L., Chaffard, V., Boubkraoui, S. & Dingkuhn, M. (2009) A multiscale observation and modeling study in the millet zone in Niger: the role of intraseasonal variability of rainfall on yields. *Third International AMMA Conference*, July 20—24, at Ouagadougou, Burkina Faso.

Bella-Medjo, M., Sultan, B. & Janicot, S. (2009) The role of rainfall parameters in the cotton yield in the north of Cameroon. *Third International AMMA Conference*, July 20—24, at Ouagadougou, Burkina Faso.

Berg, A., Sultan, B. & De Noblet, N. (2009) Simulating crop yields over West Africa with ORCHIDEE: sensitivity of model skill to rainfall forcing. *Third International AMMA Conference*, July 20—24, at Ouagadougou, Burkina Faso.

Alhassane, A., Traoré, S. B., Baron, C., Muller, B., Sultan, B., Dingkuhn, M. & Zouzou, M. (2009) Adaptation and evaluation of the SARRA-H crop model for agricultural yield forecasting in West Africa. *Third International AMMA Conference*, July 20—24, at Ouagadougou, Burkina Faso.

Gueye, A. K., Diop, M., Sultan, B., Niang, A., Sawadogo, S. & Janicot, S. (2009) Examining the performance of a statistical downscaling method through the use of a crop model: a case study in Senegal. *Third International AMMA Conference*, July 20—24, at Ouagadougou, Burkina Faso.

Redelsperger, J.-L., Diedhiou, A., Janicot, S., Karambiri, H., Lebel, T., Morse, A. P., Mertz, O., Sultan, B. & Thorncroft, C. D. (2009) The AMMA Programme: a tentative summary of achievements. *Third International AMMA Conference*, July 20—24, at Ouagadougou, Burkina Faso.

Rust H.W., M. Vrac, M. Lengaigne and B. Sultan (2009) Quantifying Differences between Present and Future Weather Types, *EGU, April 2009*, Vienna.

Berg A., B. Sultan, P. Quirion (2008) Can weather index protect poor farmers against a bad rainy season ? a case study on Burkina-Faso. Seasonal forecasting in West Africa, its applications, and anticipating future climate change, Joint AMMA/ENSEMBLES workshop, 26-30 May 2008, Niamey, Niger.

Sultan B, Barbier B and Fortilus JMR (2008) Measuring the potential benefits of climate prediction to agriculture: an academic study in Senegal. Seasonal forecasting in West Africa, its applications, and anticipating future climate change, Joint AMMA/ENSEMBLES workshop, 26-30 May 2008, Niamey, Niger.

Sultan B., Janicot S. (2008) Medium lead-time predictability of intra-seasonal variability of rainfall in West Africa, Seasonal forecasting in West Africa, its applications, and anticipating future climate change, Joint AMMA/ENSEMBLES workshop, 26-30 May 2008, Niamey, Niger.

Berg A., Sultan B., N. de Noblet (2008) Including tropical croplands in a terrestrial biosphere model: application to West Africa, Seasonal forecasting in West Africa, its applications, and anticipating future climate change, Joint AMMA/ENSEMBLES workshop, 26-30 May 2008, Niamey, Niger.

Martiny N., B. Sultan, I. Chiapello and B. Fontaine (2008) Analysis of the relationships between climate/aerosols and meningitis epidemics in Western Africa, Seasonal forecasting in West Africa, its applications, and anticipating future climate change, Joint AMMA/ENSEMBLES workshop, 26-30 May 2008, Niamey, Niger.

Lazar A., C. Serraud, A. Drumond, B. Sultan, I. Wainer et S. Janicot (2007) Latitudinal migration of the AMITCZ : a study of the role of the ocean in Spring, 2e International AMMA Conference, 26-30 Nov. 2007, Karlsruhe, Germany.

Berg A., B. Labbouz, P. Quirion et B. Sultan (2007) A room for weather index based insurance for agriculture in West Africa? 2e International AMMA Conference, 26-30 Nov. 2007, Karlsruhe, Germany.

Berg A., N. De Noblet and B. Sultan (2007) Including Tropical Croplands in a Terrestrial Biosphere Model: application to West Africa, 2e International AMMA Conference, 26-30 Nov. 2007, Karlsruhe, Germany.

A. Alhassane A., S. Traore, C. Baron, B. Muller, B. Sultan, M. Dingkuhn et M. Zouzou (2007) Modeling the Growth and Development of Pearl Millet under Limited Conditions of Water and Nitrogen Supply: Evaluation and Adaptation of the SARRA-H Model in Niger, 2e International AMMA Conference, 26-30 Nov. 2007, Karlsruhe, Germany.

B. Toulouse, C. Mering and B. Sultan (2007) Analysis of recent climatic impacts on the Sahelian savannah by Remote Sensing, 2e International AMMA Conference, 26-30 Nov. 2007, Karlsruhe, Germany.

Bastin S., Drobinski P., Sultan B., Janicot S., Basdevant C., Verdier N. and A. Vargaz (2007) Investigation of surface heterogeneities and diurnal cycle on the west african monsoon flow using constant volume balloons in the planetary boundary layer, European Geophysical Union, 28 april, Vienna, Austria.

Sultan B., S. Janicot, A. Lazar and C. Menkes (2004), The atmospheric dynamics of the West African monsoon onset and its ocean counterpart, Eos. Trans. AGU, 85(47) , Fall Meeting suppl., Abstract A43B-0046, 13-17 Dec 2004, San Francisco, California.

Sultan B. et S. Janicot (2003), The onset of the summer monsoon in West Africa : a role of the heat low dynamics ? European Geophysical Society, 6-11 april 2003, Nice, France.

Sultan B. et S. Janicot (2003), The West African monsoon dynamics : The onset of the summer monsoon and the intra-seasonal variability of convection, Monsoon environments: Agricultural and Hydrological Impacts of seasonal variability and Climate Change, 24-28 March 2003, The Abdus Salam international center of theoretical physics (ICTP), Trieste, Italie.

Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn, et S. Janicot (2003), The West African monsoon dynamics : Agricultural impacts in sahelian area, Monsoon environments: Agricultural and Hydrological Impacts of seasonal variability and Climate Change, 24-28 March 2003, The Abdus Salam international center of theoretical physics (ICTP), Trieste, Italie.

Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn, et S. Janicot (2003), Agricultural impacts of intra-seasonal variability of the summer monsoon in sahelian area, Agriculture, Climate Change and Economic Consequences – from Description to Mitigation, EPN Workshop, 19-21 February 2003, Copenhagen, Denmark.

Sultan B. et S. Janicot (2002), The role of the intra-seasonal time-scale variability in the West African monsoon, European Geophysical Society, 21-26 April 2002, Nice, France.

Janicot S. et B. Sultan (2002), Intra-seasonal variability in the West African monsoon, Promise Workshop, 13-15 May 2002, Paris, France.

Sultan B. et S. Janicot (2001), Intra-seasonal modulation of convection in the West African monsoon, Climate variability and land-surface processes : Physical interactions and regional impacts, 11-15 June 2001 , The Abdus Salam international center of theoretical physics (ICTP), Trieste, Italie.

Sultan B. et S. Janicot (2001), Mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest et variabilité intra-saisonnière des précipitations, 4^{ème} Forum de Prévision Saisonnière en Afrique de l'Ouest (PRESAO), 21-25 Mai 2001, Niamey, Niger.

Sultan B., J-P. Duvel et S. Janicot (2001), West African monsoon variability at intra-seasonal time scale, European Geophysical Society, 26-30 March 2001, Nice, France.

Sultan B. et S. Janicot (2001), Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability, European Geophysical Society, 26-30 March 2001, Nice, France.

Servat E., B. Sultan, G. Mahé et J. Maley (2000), Climatic variability in "undisturbed" forests, including ENSO events, droughts, extreme events. Forests, Water, People in the humid tropics : past, present and future hydrological research for integrated land and water management. UNESCO. International Hydrological Programme, July 2000, Kuala Lumpur, Malaisie.

Communications internationales par voie d'affiche (poster) avec actes

Sultan B., Drobinski P. and S. Janicot, (2005), Characterization of the monsoon circulation diurnal cycle around the monsoon onset, First International AMMA Conference, 28 Nov. – 2 Dec. 2005, Dakar, Senegal.

Correia C., Sultan B. and S. Janicot, (2005), Short-lead predictions of intraseasonal oscillations of the convective activity in West Africa, First International AMMA Conference, 28 Nov. – 2 Dec. 2005, Dakar, Senegal.

Correia C., Sultan B. and S. Janicot, (2005), Short-lead predictions of intraseasonal oscillations of the convective activity in West Africa, First International AMMA Conference, 28 Nov. – 2 Dec. 2005, Dakar, Senegal.

Bella-Medjo M., Sultan B. and S. Janicot, (2005), Analysis of the seasonal cycle of the African monsoon. Regional applications on Cameroon, First International AMMA Conference, 28 Nov. – 2 Dec. 2005, Dakar, Senegal.

Communications internationales par voie d'affiche (poster) sans actes

Berg A., De Noblet N., Sultan B., Guimberteau M. and Lengaigne M. (2010) Projections of climate change impacts on potential crop yields in Africa and India with an agro-DGVM, *AGU, Fall Meeting 2010*, San Francisco.

Sultan B., Oettli P., Vrac M. and Baron C. (2010) Assessing the performance of dynamical and statistical downscaling techniques to simulate crop yield in West Africa, *AGU, Fall Meeting 2010*, San Francisco.

Rust H.W., Vrac, M., Lengaigne M. and B. Sultan (2008) Changing Weather Types in the 2007 IPCC Models, *AGU, Fall Meeting 2008*, San Francisco.

Sultan B., S. Janicot, et P Drobinski (2007) Characterization of the diurnal cycle of the West African monsoon around the monsoon onset, 2e International AMMA Conference, 26-30 Nov. 2007, Karlsruhe, Germany..

Sultan B., S. Janicot (2007) Short-lead predictability of intraseasonal oscillations of the convective activity in West Africa, 2e International AMMA Conference, 26-30 Nov. 2007, Karlsruhe, Germany..

Gervois S., S. Janicot, I. Musat, M. B. Rodriguez de Fonseca, E. Mohino, J. Bader, P. Ruti, S. Tyteca and B. Sultan (2007) Impacts of global SST anomalies on West African Monsoon : a modelling approach, 2e International AMMA Conference, 26-30 Nov. 2007, Karlsruhe, Germany..

Bastin S., P. Drobinski, C. Basdevant, B. Sultan, S. Janicot, N. Verdier and A. Vargas (2007) Towards a better understanding of the small-scale monsoon flow dynamics and evaluation of its representation in ECMWF analyses using the constant volume balloons and numerical simulations, 2e International AMMA Conference, 26-30 Nov. 2007, Karlsruhe, Germany..

Bella-Medjo M., B. Sultan, A. Berg, E. Blanc and P. Quirion (2007) The role of climate in cotton yields in West Africa. 2e International AMMA Conference, 26-30 Nov. 2007, Karlsruhe, Germany..

Gueye A., A. Niang, S. Thiria, S. Janicot and B. Sultan (2008) Characterization of synoptic weather regimes over Senegal during the summer monsoon through self-organizing maps. European Geophysical Union, 27 april 2008, Vienna, Austria.

Sultan B. and S. Janicot (2008) Short-lead predictability of intraseasonal oscillations of the convective activity in West Africa. European Geophysical Union, 27 april 2008, Vienna, Austria.

Sultan B., M. Bella-Medjo, A. Berg, P. Quirion and S. Janicot (2008) Multi-scales and multi-sites analysis of the role of climate in cotton yields in West Africa European Geophysical Union, 27 april 2008, Vienna, Austria.

Berg A., B. Sultan and N. de Noblet (2008) Including tropical croplands in a terrestrial biosphere model: application to West Africa. European Geophysical Union, 27 april 2008, Vienna, Austria.

Sultan B., Janicot S. and Drobinski P. (2007), Characterization of the diurnal cycle of the West African monsoon around the monsoon onset, European Geophysical Union, 28 april, Vienna, Austria.

Sultan B., S. Janicot, A. Lazar and C. Menkes (2005), The atmospheric dynamics of the West African monsoon onset and its ocean counterpart, European Geophysical Union, 28 april, Vienna, Austria.

Sultan B., S. Janicot and J-F. Guégan (2005), Climate and meningitis epidemics onset in West Africa, European Geophysical Union, 28 april, Vienna, Austria.

Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn et S. Janicot (2005), Agricultural impacts of regional variability of the West African monsoon, European Geophysical Union, 28 april, Vienna, Austria.

Drobinski P., B. Sultan, et S. Janicot (2005). Role of the Hoggar massif on the West African monsoon onset, European Geophysical Union, 28 april, Vienna, Austria. Accepté.

Sultan B., K. Labadi, G. Beltrando et S. Janicot (2004), L'épidémie de méningite au Mali et la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest, Atelier de modélisation en épidémiologie , 8-14 Mars 2004, Cargèse, France.

Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn, et S. Janicot (2003), Agricultural impacts of intra-seasonal variability of rainfall in sahelian area, European Geophysical Society, 6-11 april 2003, Nice, France.

Sultan B. et S. Janicot (2002), The role of the intra-seasonal time-scale variability in the West African monsoon, European Geophysical Society, 21-26 April 2002, Nice, France.

Janicot S. et B. Sultan (2000), Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal modulation of convection, European Geophysical Society, 15 April 2000, Nice, France.

7.4 Communications nationales et séminaires

Sultan B. (2011) Quantifier les impacts du climat en Afrique de l'Ouest, *Séminaire de l'Agence Nationale de la Météorologie du Sénégal (ANAMS)*, Dakar, Sénégal, 11 avril 2011.

Sultan B. (2010) Comprendre les bouleversements climatiques à l'échelle régionale, *Séminaire du GIS-CES : Adaptation au changement climatique en zones vulnérables*, 15-16 Juin 2010. Orateur Invité.

Oettli, P., Sultan, B., Baron, C. & Vrac, M. (2010) Evaluation des biais des modèles régionaux: le point de vue des impacts agronomiques. *Atelier AMMA*, Toulouse, France 3-5 Novembre 2010.

Sultan B. (2009) Quantification des bénéfices des prévisions saisonnières pour l'agriculture en Afrique de l'Ouest, *Réunion d'équipe*, 24 avril 2009.

Sultan B., I. Chiapello and M. Aouam (2007) Le rôle du climat et des aérosols sur les épidémies de méningite en Afrique de l'Ouest. Colloque GDR MSG-ATR, « *MSG, un nouvel outil pour l'étude de l'environnement* », Dijon, 13-14 sept. 2007.

Sultan B. et S. Janicot (2007), L'épidémie de méningite et la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest, *Séminaire de la faculté de médecine de Necker*, 12 février 2007, Paris, France.

Sultan B., (2006), Les impacts du climat sur l'agriculture en Afrique de l'Ouest, *Séminaire du CRC*, 29 Novembre 2006, Dijon, France.

Sultan B., (2006), Les impacts du climat sur l'agriculture en Afrique de l'Ouest, *Séminaire 2IE (ex-EIER)*, 2 Novembre 2006, Ouagadougou, Burkina Faso.

Sultan B., (2006), Les impacts du climat en Afrique de l'Ouest, *Séminaire de l'AGRHYMET*, 12 Juillet 2006, Niamey, Niger.

Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn et S. Janicot (2005), Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon, *AMMA Agriculture and Climate Workshop*, 6-9 Dec. 2005, Thiès, Sénégal.

Sultan B. (2004), 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, *Séminaire du CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement)*, 15 Juin 2004, Montpellier, France.

Sultan B. (2004), 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, *Séminaire du CNRM - Météo-France*, 16 Mars 2003, Toulouse, France.

Sultan B., K. Labadi, G. Beltrando et S. Janicot (2003), L'épidémie de méningite au Mali et la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest, *Séminaire du CEPM (Centre d'Etude sur le Polymorphisme des Micro-Organismes)*, 17 décembre 2003, Montpellier, France.

C. Baron et B. Sultan (2003), Un outil de désagrégation des données pour le passage d'échelles : impacts des échelles d'agrégation sur un modèle ponctuel, *Formation à la modélisation des cultures*, 28 novembre 2003, Montpellier, France.

Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn, et S. Janicot (2003), Applications agronomiques de l'étude de la dynamique régionale de la mousson africaine, *Formation à la modélisation des cultures*, 28 novembre 2003, Montpellier, France.

Sultan B. (2003), 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, *Séminaire de l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace des Sciences de l'Environnement)*, 6 mars 2003, Paris, France.

Sultan B., C. Baron, M. Dingkuhn, et S. Janicot (2002), Etude de la dynamique de la mousson ouest-africaine : les applications agronomiques, *Les catastrophes naturelles sont-elles naturelles ?*, Séminaire proposé par l'équipe DYNAMIRIS - PRODIG UMR 8586 du CNRS, Ecole doctorale EESC (Economies, Espaces, Sociétés, Civilisations), 15 novembre 2002, Paris, France.

7.5 Communications diverses

Fiches d'actualités scientifiques de l'IRD (2011) Prédire la pluie pour réduire l'insécurité alimentaire Avril 2011 - N°372.

RFI (2011) Les chercheurs de l'IRD misent sur la météo pour réduire l'insécurité alimentaire - RFI - Article publié le mardi 03 mai 2011: <http://www.rfi.fr/science/20110503-chercheurs-ird-misent-meteo-reduire-insecurite-alimentaire>

Univers Nature (2011) Les prévisions climatiques : atout majeur de la production agricole - Univers Nature - L'environnement sur le Web – Article publié le 09-05-2011: http://www.univers-nature.com/inf/inf_actualite1.cgi?id=4674

Actualités de l'IRD (2011) Escape : Changements environnementaux et sociaux en Afrique - passé, présent et futur – 16 Mars 2011 - <http://www.ird.fr/toute-l-actualite/actualites/escape-changements-environnementaux-et-sociaux-en-afrique-passe-present-et-futur>

Sciences au Sud (2010) Paysan virtuel et bioéconomie climatique, 53, Jan-Fev-Mar 2010.

Wapiti (2010) Qu'est-ce que la mousson ? 285 (12/2010) 24-25, Milan, Toulouse.

Sciences au Sud (2009) La mousson africaine mobilise, 52, Nov-Dec 2009, p4.

Sciences au Sud (2008), Epidémiologie-météorologie au Sahel, 47, Nov-Dec 2008, p.2.

Sultan B. (2008) Le projet REGYNA « REGionalisation des précipitations et impacts hYdrologiques et agROnomiques du changement climAtique en régions vulnérables », *Colloque du GIS « Climat-Environnement-Sociétés »*, 23 mai 2008, Paris, France.

Sultan B. (2008) Origines et impacts des variations climatiques sur les sociétés en Afrique de l'Ouest, *Enjeux économiques et sociaux de la désertification en Afrique de l'ouest*, Association Averroès, 13 mars 2008, Paris, France.

Sultan B. (2008) Les impacts du climat en Afrique de l'Ouest et le programme AMMA. *Institut Pratique de Journalisme*, Mars 2008, Paris, France.

Bulletins hebdomadaires « AMMA Operational Center – Paris », 20 numéros (2006) http://aoc-paris.ipsl.polytechnique.fr/documents/cat_view-3.html

Sultan B. (2006), Les impacts du climat sur les sociétés en Afrique de l'Ouest, *Séminaire Fête de la Science 2006, Novembre 2006, Paris, France*.

Direct-8 (2006) Compléments Terre - Emission spéciale AMMA, 23 octobre 2006, 9h.

France-24 (2006) Emission spéciale AMMA, décembre 2006.

Sultan B. (2006), Climate and Agriculture in West Africa. *CLARIS Meeting*, 22 Juin 2006, Paris, France.

Sciences au Sud (2005), Les épidémies de méningite modélisées ! 30, Mai-Juillet 2005 p.1 (couverture).

Fiches scientifiques de l'IRD (2005), Afrique de l'Ouest : les épidémies de méningite sous l'influence du vent. *Fiche 219*, février 2005.

Science et vie (2005), Epidémiologie : en Afrique, la méningite frappe au gré du vent, 1050, mars 2005, p. 29.

Science et avenir (2005), Epidémiologie : le vent qui annonce les méningites, 697, mars 2005, p. 31.

Libération (2/02/05) Le climat pourrait régler les méningites au Sahel

Le Monde (28/01/05) Médecine : les épidémies de méningite en Afrique de l'Ouest

Sultan B. (2004), Study of the oceanic impact of the Monsoon shift: project of analysis with the ORCA ocean model, *ANETUS Workshop*, 22-23 Nov 2004, Paris, France.

7.6 Directions de stages universitaires

C. Correia (2005)

En 2005, j'ai co-encadré avec S. Janicot un étudiant de 3^e cycle C. Correia pour un stage de 5 mois en vue de l'obtention de son diplôme de Master « Mathématiques et informatiques appliquées aux sciences du vivant » à l'université Paris 5 René Descartes. L'objectif de son stage a été d'élaborer des modèles statistiques de prévision à courte échéance de la variabilité intra-saisonnière de la mousson africaine. J'ai prolongé de quelques mois le stage de C. Correia avec des financements issus de contrats pour le permettre de finaliser les derniers résultats qui ont fait l'objet d'une publication :

Sultan B., S. Janicot and C. Correia (2009) Medium lead-time predictability of intraseasonal variability of rainfall in West Africa, *Weather and Forecasting*, 24, 767–784.

A. Berg (2006)

En 2006, j'ai co-encadré avec N. de Noblet (LSCE) un étudiant de 3^e cycle A. Berg, ingénieur à l'INAPG, pour un stage de 5 mois en vue de l'obtention de son diplôme de Master « Sciences et Technologie du Vivant ». L'objectif de son stage a été d'élaborer un modèle grande-échelle couplant le climat et l'agronomie. J'ai pu prolonger son stage en l'engageant comme contractuel au LOCEAN pendant un an au LOCEAN sur le programme AMMA. Alexis Berg a ensuite effectué sa thèse de doctorat au LOCEAN et au LSCE (voir plus haut). Au cours de cette période j'ai co-écrit deux articles avec Alexis :

Berg A., P. Quirion and B. Sultan (2009) Can weather index drought insurance benefit to Least Developed Countries' farmers? A case study on Burkina Faso, *Weather, Climate and Society*, 1, 71–84.

Sultan B., M. Bella-Medjo, A. Berg, P. Quirion and S. Janicot (2009) Multi-scales and multi-sites analysis of the role of climate in cotton yields in West Africa, *International Journal of Climatology*, DOI 10.1002/joc.1872.

M. Aouam (2007)

En 2007, j'ai encadré une étudiante de 3^e cycle M. Aouam pour un stage de 5 mois en vue de l'obtention de son diplôme de Master « Mathématiques et informatiques appliquées aux sciences du vivant » à l'université Paris 5 René Descartes. L'objectif de son stage a été de quantifier statistiquement le lien entre la méningite et les aérosols désertiques.

JMR Fortilus (2008)

En 2008, j'encadre une étudiante de 3^e cycle J.M.R. Fortilus, ingénieur à l'INAPG pour un stage de 4 mois en vue de l'obtention de son diplôme de Master « Economie du développement durable de l'environnement et de l'énergie ». L'objectif de son stage est de

réaliser une analyse coût-bénéfice de l'utilisation de la prévision saisonnière par les agriculteurs en Afrique de l'Ouest. Nous en avons tiré une publication commune :

Sultan B., B. Barbier, J. Fortilus, S.M. Mbaye and G. Leclerc (2010) Estimating the potential economic value of the seasonal forecasts in West Africa: a long-term ex-ante assessment in Senegal, *Weather, Climate and Society*, 2, 69–87.

7.7 Co-directions de thèses de 3^{ème} cycle

P. Roudier (débutée en octobre 2008)

Je co-encadre la thèse de Philippe Roudier avec Philippe Quirion (CIRED) sur les stratégies d'adaptation face à la variabilité et au changement climatique en Afrique de l'Ouest. Nous sommes auteurs de 2 publications communes et une troisième est sur le point d'être soumise :

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*, in press.

Roudier P., Sultan B., Quirion P., Baron C., Alhassane A., Traoré S. and B. Muller (2011) An ex-ante evaluation of seasonal forecasting for millet growers in SW Niger, *International Journal of Climatology*, in press.

A. Berg (décembre 2007 - 7 mars 2011)

J'ai co-encadré la thèse d'Alexis Berg au LOCEAN avec Nathalie de Noblet-Ducoudré (LSCE) sur la représentation des zones cultivées tropicales dans le modèle de surface continentale ORCHIDEE: apport à l'étude des interactions climat/agriculture. Alexis a bénéficié d'une bourse doctorale de la région Ile de France. Au cours de cette thèse, nous avons écrit 3 articles communs (dont un soumis) dans le cadre de sa thèse :

Berg A., B. Sultan and N. De Noblet (2010) Including Tropical Croplands in a Terrestrial Biosphere Model: Application to West Africa, *Climatic Change*, DOI: 10.1007/s10584-010-9874-x, Online First.

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

Berg A., de Noblet-Ducoudré N., Sultan B., Lengaigne M. and M. Guimberteau (2011) Projections of climate change impacts on potential crop productivity over tropical regions, *Agricultural and Forest Meteorology*, submitted.

M. Bella-Medjo (octobre 2004 – 7 novembre 2008)

J'ai co-encadré la thèse de M. Bella-Medjo au LOCEAN avec S. Janicot et M. Kamga (Laboratory for Environmental Modelling and Atmospheric Physics, Université de Yaoundé I) sur l'analyse de la variabilité du climat au Cameroun. Cette étudiante a bénéficié d'une bourse IRD en co-tutelle entre le LOCEAN et l'Université de Yaoundé (Cameroun). Nous avons publié un article commun :

Sultan B., M. Bella-Medjo, A. Berg, P. Quirion and S. Janicot (2009) Multi-scales and multi-sites analysis of the role of climate in cotton yields in West Africa, *International Journal of Climatology*, DOI 10.1002/joc.1872.

Elle a poursuivi son travail de thèse dans le cadre un contrat postdoc au LOCEAN financé par le projet ANR PICREVAAT.

R. Marteau (soutenue le 28 septembre 2010)

J'ai contribué à l'encadrement de la thèse de Romain Marteau sur la prévisibilité de la variabilité intra-saisonnière des pluies en Afrique de l'Ouest sous la direction de Bernard

Fontaine, Nathalie Philippon au CRC et Vincent Moron du CEREGE. Nous avons soumis une publication commune:

Marteau, R., Sultan, B., Baron, C., Moron V., Traoré, S.B., and Alhassane, A. (2011) The onset of the rainy season and the farmer's sowing strategy for pearl millet cultivation in Southwest Niger, *Agricultural and Forest Meteorology*, en révision.

P. Yaka (soutenu en décembre 2007)

J'ai participé à l'encadrement de la thèse de P. Yaka à PRODIG sur l'influence du climat sur les épidémies de méningite en Afrique de l'Ouest. Nous avons publié un article commun:

Yaka P., B. Sultan, H. Broutin, S. Janicot, S. Philippon and N. Fourquet (2008) Relationships between climate and year-to-year variability in meningitis outbreaks: a case study in Burkina Faso and Niger, *International Journal of Health Geographics*, 7 : 34. Doi :10.1186/1476-072X-7-34.

P. Yaka est ensuite retourné au Burkina Faso où il dirige la section Environnement et Bioclimatologie à la Direction Nationale de la Météorologie à Ouagadougou.

A. Gueye (soutenu en décembre 2010)

J'ai participé à l'encadrement de la thèse de A. Gueye sur la désagrégation des pluies au Sénégal. Cet étudiant a bénéficié d'une bourse IRD en co-tutelle entre le LOCEAN et l'Université Cheikh Antah Diop de Dakar. Nous sommes auteurs d'une publication commune :

Gueye A.K., Janicot S., Niang A., Swadogo S., Sultan B., Diongue-Niang A. And Thiria S. (2010) Weather regimes over Senegal during the summer monsoon season with Self-Organizing Maps. Part I: Synoptic time scale, *Climate Dynamics*, DOI: 10.1007/s00382-010-0782-6, Online First.

7.8 Encadrement de contractuels et post-doctorants

A. Berg (2006 - 2007)

Dans le cadre du projet AMMA, Alexis Berg a été recruté sur une durée d'un an au LOCEAN pour travailler sur les assurances agricoles en collaboration avec Philippe Quirion, économiste au CIRED. Au cours de cette période, nous avons réalisé une publication commune :

Berg A., P. Quirion and B. Sultan (2009) Can weather index drought insurance benefit to Least Developed Countries' farmers? A case study on Burkina Faso, *Weather, Climate and Society*, 1, 71–84.

H. Rust (2008-2009)

Dans le cadre du projet REGYNA que je coordonne, Henning Rust a été recruté sur une durée d'un an et demi au LSCE pour travailler sur les régimes de temps dans les modèles de climat en collaboration avec Mathieu Vrac (LSCE) et Matthieu Lengaigne (LOCEAN). Nous sommes les auteurs d'une publication commune :

Rust H., Vrac M., Lengaigne M. and B. Sultan (2010) Quantifying differences in circulation patterns based on probabilistic models: IPCC-AR4 multi-model comparison for the North Atlantic. *Journal of Climate*, 23, 6573-6589, doi: 10.1175/2010JCLI3432.1.

P. Oettli (2009-2010)

Dans le cadre du projet REGYNA que je coordonne et du projet AMMA, Pascal Oettli a été recruté sur une durée d'un an et demi au LOCEAN pour travailler sur les couplages entre les modèles régionaux et le modèle agronomique SARRAH. Nous sommes co-auteurs de deux publications issues de ce travail :

Oettli P., Sultan B., Baron C. and Vrac M. (2011) Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa?, *Environmental Research Letter*, 6 (2011) 014008.

Traoré, S. B., Alhassane, A., Muller, B., Kouressy, M., Somé, L., Sultan, B., Oettli, P., Siéné L., Ambroise C., Sangaré, S., Vaksman, M., Diop, M., Dingkhun, M., Baron, C. (2010) Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa, *Atmospheric Science Letter*, 1530-261X, <http://dx.doi.org/10.1002/asl.295>, 10.1002/asl.295.

7.9 Participations à des jurys de thèse de 3^{ème} cycle

Septembre 2010 : Examineur de la thèse de Romain Marteau : « *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* » sous la direction de Vincent Moron et Bernard Fontaine.

Juillet 2008 : Rapporteur de la thèse de Samuel Louvet : « *Modulations intrasaisonniers de la mousson d'Afrique de l'Ouest et impacts sur les vecteurs du paludisme à Ndiop (Sénégal) : diagnostics et prévisibilité* » sous la direction de Bernard Fontaine et Pascal Roucou, soutenu le 4 juillet 2008.

7.10 Participations à des projets nationaux et internationaux

Projets nationaux

Dans le cadre du projet AMMA-API, je coordonne les actions sur les impacts du climat sur l'agriculture, ce qui implique l'organisation de réunions, la rédaction de rapports annuels pour le Comité Scientifique du programme, la rédaction de demandes de financements ainsi qu'une aide logistique (transferts de matériels, recrutement d'étudiants pour effectuer des missions en Afrique) pour les enquêtes agronomiques menées dans ce groupe de travail. A ce titre je fais partie du Comité de Coordination Mousson Africaine (CCMA) qui réunit tous les coordinateurs des groupes de travail du projet AMMA-API.

En 2005 et en 2006, j'ai également contribué à la rédaction de plusieurs réponses à des appels d'offre ANR (IRCAAM, AUTREMENT) et IPSL (projet Coton) qui ont été financées. Depuis le début de l'année 2008, je porte le projet REGYNA financé par le GIS « Climat-Environnement-Sociétés » qui réunit le LOCEAN, le LMD, le CIRED, le LSCE en collaboration avec le LMTG, le CIRAD, l'UFAM (Universidade Federal do Amazonas – Manaus) et l'AGRHYMET. Le budget global du projet est de 285.45k€ sur 4 ans. Au sein de ce projet, je coordonne les actions des différents laboratoires, gère les demandes financières et rédige les rapports du projet. Depuis 2009, je suis responsable d'un workpackage dans le projet ANR PICREVAT financé par ANR VMCS « Edition 2009 » coordonné par Vincent Moron. Depuis 2011, je coordonne un projet ANR « ESCAPE » financé par l'ANR CEP&S « Edition 2010) qui regroupe 8 laboratoires français et 9 instituts africains avec une aide totale accordée de 1 660 k€.

En 2008, j'ai participé à la prospective de l'IPSL qui est un regroupement de laboratoires des sciences de l'environnement en Ile-de-France dont fait partie le LOCEAN. J'ai co-animé un groupe de réflexion sur les impacts du climat et de l'environnement. Dans ce cadre, j'ai organisé une réunion, participé à 3 réunions avec les directeurs de laboratoire et rédigé le chapitre de prospective de l'IPSL sur les impacts. Ce texte préconise notamment la création

d'une plateforme au sein de l'IPSL dédiée aux Interactions Climat-Environnement-Sociétés (ICES). L'objectif de cette plateforme serait de créer et de structurer une recherche interdisciplinaire et trans-sectorielle autour du thème ICES en s'appuyant en partie sur les recherches environnementales réalisées au sein des laboratoires de l'IPSL et sur les compétences de chercheurs de différentes disciplines (« environnement » et « non environnement »). Cette plateforme servirait donc de catalyseur pour créer une dynamique de long terme de recherche pluridisciplinaire. Au cours des dix années à venir, elle aurait de fait pour objectif d'intégrer des chercheurs d'autres disciplines afin de renforcer une approche interdisciplinaire des interactions Climat-Environnement-Sociétés. Son fonctionnement inclurait des séminaires d'intérêt général (médecins, biologistes...), des discussions sur les projets et les appels d'offre, le partage des données et méthodes, etc. Cette plateforme veillerait également à discuter et au mieux à résoudre les difficultés rencontrées dans ce thème (accès aux données, intérêt limité des autres disciplines sur ce type d'études, etc.).

En 2008, j'ai également participé activement à la prospective du LOCEAN autour du thème de la régionalisation et des impacts du climat. J'ai participé à un grand nombre de réunion et assemblées générales et co-rédigé le chapitre du document de prospective dédié à ce thème. J'ai également fait une présentation en assemblée générale du thème devant le comité de visite de l'AERES en charge d'évaluer le laboratoire. Au terme de cette prospective, il a été entériné la création d'une nouvelle équipe au LOCEAN dédiée à la régionalisation et aux interactions Climat-Environnement-Sociétés (RICLES). Cette équipe dans laquelle émergent 14 chercheurs en équipe principale ou secondaire marque l'importance croissante au laboratoire mais aussi dans la communauté scientifique nationale du thème des impacts climatiques qui sous-tend mes activités de recherche. Elle a d'ailleurs été très bien évaluée par le comité de visite de l'AERES en charge d'évaluer le LOCEAN. Je suis responsable de cette équipe depuis le début du nouveau quadriennal du laboratoire 2009-2012.

Projets internationaux

Depuis le début de mes travaux de thèse au LMD, j'ai été impliqué dans plusieurs projets européens (FP4 WAMP, FP5 PROMISE) dédiés à la prévisibilité et à la variabilité de la mousson mais aussi ses impacts agronomiques et hydrologiques. Récemment j'ai été très impliqué dans le projet FP6 AMMA en particulier sur les groupes de travail portant sur le climat et ses impacts (j'ai rédigé plusieurs rapports et fournis des livrables et j'ai participé en campagne de terrain en Afrique en 2006). Plus récemment (janvier 2010), j'ai coordonné une réponse à l'appel d'offre du FP7 "ENV.2010.1.3.3-1 Early warning and forecasting systems to predict climate related drought vulnerability and risks in Africa". Le projet soumis a impliqué un grand nombre d'instituts français, européens et africains ainsi qu'une ONG: IRD (LOCEAN, LTHE), CNRS (CRC, LSCE, LMTG), ICTP (Italie), CNR (Italie), UBO (Allemagne), 2IE (Burkina Faso), AGRHYMET (Niger), ENEA (Italie), ACMAD (Niger), AAU (Ethiopie), Action Contre la Faim (Espagne), CSIR (Ghana), NMA Ethiopia, NMA Ghana, DNM Mali. Il a été très bien évalué par la commission européenne et a obtenu la note de 13/15. Il n'a malheureusement pas été retenu car seul un projet sur l'appel d'offre a été financé. Le montage de ce projet m'a cependant permis d'étendre mon réseau de collaboration à l'international.

7.11 Coopération scientifique avec les partenaires africains

Au cours de mes travaux, j'ai eu l'occasion de collaborer étroitement avec de nombreux collègues africains avec lesquels j'ai co-signé 12 publications. Pour favoriser ces

collaborations, j'ai effectué des missions régulières en Afrique où j'ai donné des séminaires scientifiques, monté des projets et participé à des projets avec des partenaires africains, co-encadré des étudiants en thèses, invité régulièrement des chercheurs africains, publié mes travaux dans des revues françaises plus facilement accessibles pour la communauté scientifique africaine.

7.12 Expertise de manuscrits et de projets scientifiques

Je suis rapporteur d'articles scientifiques pour les revues *Sécheresse*, *Bulletin of American Meteorological Society*, *International Journal of Climatology*, *Geophysical Research Letters*, *Journal of Climate*, *Journal of Geophysical Research*, *Monthly Weather Review*, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *la revue des Sciences de l'eau*, *Téledétection*, *la Climatologie*, *Atmospheric Science Letters*, *Climate Dynamics*, *Agricultural and Forest Meteorology and Regional Environmental Change*.

J'ai également été rapporteur pour des actes de conférences (*colloque de l'AIC*, *colloque Friend AOC Montpellier*).

Je suis également régulièrement sollicité pour évaluer des demandes de financement pour des projets scientifiques américains (CLIVAR, NSF, NOAA), anglais (NERC) et français (BEST, RIPIECSA).