



Project no. 004089  
AMMA  
African Monsoon Multidisciplinary Analysis  
Instrument: IP  
Thematic priority: 1.1.6.3 Global change and Ecosystems

WP 3.1: Land Productivity

D 3.1 d

**"Farmers millet yields variability assessment, millet yield gap analysis (climatic/non climatic factors) and validation of crop model to predict "average regional" farmers millet yield in Senegal and Niger"**

Start of the project: 2005

Duration: 60 months

In charge of the deliverable : CIRAD

Christian Baron<sup>1</sup>, Seydou Traore<sup>2</sup>, Alhassane Agali<sup>2</sup>, Benjamin Sultan<sup>3</sup>, Bertrand Muller<sup>1</sup>,

December 2008

<sup>1</sup> CIRAD, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, France

<sup>2</sup> AGRHYMET Regional Centre, Niamey, Niger

<sup>3</sup> IRD/LOCEAN,

Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006)		
Dissemination Level		
PU	Public	X
PP	Restricted to other programme participants (including the Commission Services)	
RE	Restricted to a group specifies by the consortium (including the Commission Services)	
CO	Confidential, only for members of the consortium (including the Commission Services)	

## Plan

<b>I.</b>	<b><i>Cadre et objectif</i></b>	<b>3</b>
<b>II.</b>	<b><i>Matériel et Méthode</i></b>	<b>4</b>
<b>II.1.</b>	<b><i>Activités menées au Niger</i></b>	<b>4</b>
<b>II.1.i.</b>	<b><i>Suivis-enquêtes en milieu paysan</i></b>	<b>4</b>
<b>II.1.ii.</b>	<b><i>Adaptation du modèle SarraH</i></b>	<b>5</b>
<b>II.1.iii.</b>	<b><i>Scénarii de simulations des situations paysannes</i></b>	<b>8</b>
<b>II.2.</b>	<b><i>Activités menées au Sénégal</i></b>	<b>9</b>
<b>II.2.i.</b>	<b><i>Suivis-enquêtes en milieu paysan</i></b>	<b>9</b>
<b>II.2.ii.</b>	<b><i>Adaptation du modèle SarraH</i></b>	<b>10</b>
<b>II.2.iii.</b>	<b><i>Scénarii de simulation des situations paysannes</i></b>	<b>11</b>
<b>III.</b>	<b><i>Résultats et discussion</i></b>	<b>11</b>
<b>III.1.</b>	<b><i>Analyse de la représentativité de l'échantillonnage</i></b>	<b>11</b>
<b>III.2.</b>	<b><i>Analyse de la variabilité des rendements</i></b>	<b>12</b>
<b>III.2.i.</b>	<b><i>Région de Niamey (Niger)</i></b>	<b>12</b>
<b>III.2.ii.</b>	<b><i>Département de Diourbel (Sénégal)</i></b>	<b>19</b>
<b>III.3.</b>	<b><i>Rendements moyens villageois simulés par SARRAH</i></b>	<b>21</b>
<b>III.3.i.</b>	<b><i>Région de Niamey</i></b>	<b>21</b>
<b>III.3.ii.</b>	<b><i>Région de Diourbel</i></b>	<b>24</b>
<b>III.4.</b>	<b><i>Recherche statistique de déterminants des rendements</i></b>	<b>25</b>
<b>IV.</b>	<b><i>Conclusions</i></b>	<b>26</b>

## I. Cadre et objectif

Au Sahel, la production agricole est très largement tributaire d'une pluviométrie très variable, aussi bien dans le temps (d'une année à l'autre) que dans l'espace (au cours d'une même saison). L'impact des changements climatiques à l'échelle globale sur la production agricole en Afrique de l'Ouest constitue un enjeu important, compte tenu des incertitudes liées à la nature de cet impact et des conséquences catastrophiques potentielles sur la sécurité alimentaire de cette région.

La zone du degré carré de Niamey (au Niger), a été le site privilégié de plusieurs études sur la variabilité spatiale et temporelle de la pluviométrie, notamment lors des expériences internationales APEX-Sahel et EPSAT (Lebel et al. 2000, Lebel et Amani, 1999, Lebel et Le Barbé, 1997). Les résultats de ces études ont montré la très forte variabilité de la pluviométrie non seulement événementielle, mais aussi cumulée sur tous les pas de temps, de la décade au mois et sur la saison à l'échelle d'un degré carré (environ 120 x 160 Km à la latitude de Niamey). Or, le degré carré représente la plus faible résolution spatiale de la plupart des modèles globaux de circulation atmosphérique utilisés pour les prévisions saisonnières ou les projections climatiques pour le futur.

Compte tenu de cette variabilité spatiale des pluies il est apparu important de pouvoir documenter aux mêmes échelles (locale à régionale) et dans la même maille la variabilité des rendements agricoles, afin de pouvoir en tirer des enseignements pour la mise au point d'outil d'évaluation des productions agricoles, que ce soit pour la prévision agricole saisonnière (gestion de la sécurité alimentaire) ou l'évaluation de l'impact de la variabilité et des changements climatiques sur la production agricole dans cette région (Baron et al. 2005).

C'est dans cette optique qu'a été mis en place en 2004 dans le cadre du projet international AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) un dispositif de suivis-enquêtes en milieu paysan pour documenter la variabilité spatiale des rendements du mil à l'échelle du degré carré de Niamey et sa réponse aux fluctuations climatiques à différentes échelles. Par la suite des dispositifs plus réduits ont également été mis en place au Sénégal à partir de 2006, puis au Mali et au Burkina Faso à partir de 2007 (dans le cadre de l'extension AMMA-TTC de AMMA).

Au-delà de l'intérêt informatif brut que représente ces données, car il n'existe pas à notre connaissance d'autres étude de ce type et à cette échelle depuis près de deux décennies nous informant sur la réalité des rendements paysans sahéliens (les statistiques agricoles ne fournissent pas ce type d'information), l'objectif du travail est d'arriver, à partir de ces données, à valider un outil, en l'occurrence un modèle de simulation du développement des cultures, pour la prévision des rendements aux échelles villageoises et régionales. De fait l'échelle villageoise est l'échelle opérationnelle de base pour la prévision agricole du fait qu'un terroir villageois est « un point » sur une carte auquel on associe une pluviométrie et pour lequel on essaie de déterminer le rendement moyen. La prévision à l'échelle régionale se fait par intégration des valeurs villageoises.

Le modèle qui a été considéré est SARRAH développé par le CIRAD en collaboration avec le CERAAS et l'Agrhymet.

Nous présentons ici essentiellement le travail et les résultats obtenus au Niger, qui sont plus complets du fait du plus grand nombre d'années de suivis et du plus grand nombre de villages observés. De plus au-delà des suivis il y a eu également des essais agronomiques menés à l'Agrhymet qui ont permis de bien caller le modèle utilisé, SARRAH, sur les variétés et conditions paysannes locales.

Nous évoquerons également les résultats obtenus au Sénégal en 2006 et 2007, mais pour le moment leur analyse ne peut être approfondie car les essais de caractérisation variétale n'ont été menés qu'au cours de l'hivernage 2008 et sont en cours de dépouillement.

Enfin il faut noter que les suivis-enquêtes en milieu paysan ont encore été poursuivis lors de l'hivernage 2008 dans les deux pays, ainsi qu'au Mali et au Burkina.

## **II. Matériel et Méthode**

### **II.1. Activités menées au Niger**

#### **II.1.i. Suivis-enquêtes en milieu paysan**

a) Protocoles :

Pendant les saisons pluvieuses 2004, 2005, 2006 et 2007 (et 2008 depuis ; non encore analysé), des suivis-enquêtes ont été menés dans dix villages situés dans la zone du degré carré de Niamey (Fig. 1) bénéficiant d'un pluviographe installé et suivi par l'IRD : il s'agit des villages de Alkama, Banizoumbou, Berkiawel, Garda-kouara, Karé, Koyria, Sadoré, Tanabéri, Torodi et Wankama. Dans chacun de ces villages, 30 parcelles de mil ont été choisies au hasard de façon à ce qu'elles soient a priori représentatives de tous les champs du village. De plus toutes les parcelles suivies étaient situées au maximum à une distance de 2 km du pluviographe de façon à ce que l'on puisse assumer que les pluies étaient homogènes sur chaque village.

Les informations collectées dans chaque parcelle portaient sur la date de semis, le type de sol, la topographie de la parcelle (position et pente), l'apport ou non de fertilisants (et leur type), la variété, la densité (écartements entre lignes et entre poquets ; nombre de plants par poquet après démariage), les dates des différents stades phénologiques, les éventuels dégâts subis au cours du cycle et leur origine (attaques parasitaires, mauvaises herbes, sécheresses, etc.) et enfin les rendements en grains et en paille à la récolte. Les mesures de rendements ont été effectuées sur trois carrés de rendement de 11 poquets sur 11 lignes par parcelle (soit une superficie variant entre 13 et 17 m<sup>2</sup> selon la densité de semis), puis les trois valeurs obtenues étaient moyennées pour obtenir le rendement de la parcelle.

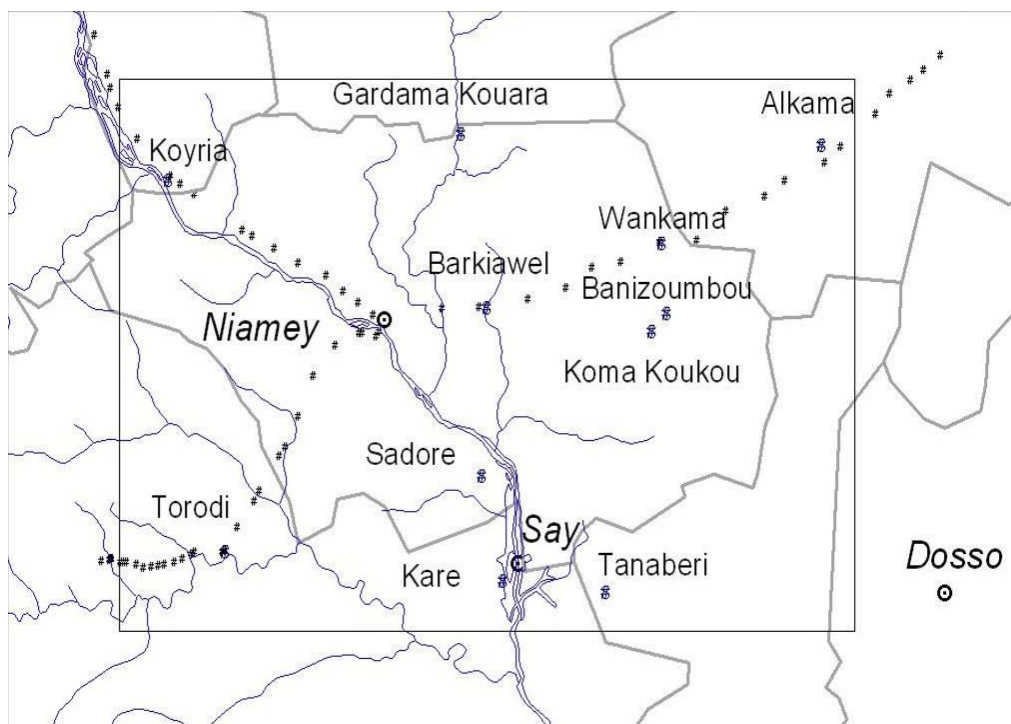


Figure 1 : Localisation des villages enquêtés dans la zone du degré carré de Niamey de 2004 à 2007.

#### b) Traitements des données :

Les données d'enquêtes ont été soigneusement contrôlées avant leur utilisation, avec une évaluation de leur qualité et cohérence et au travers d'un avis d'expert (erreurs de mesures, de saisie, prise en compte des événements constatés de visu, etc...). Un jeu épuré des erreurs soupçonnées a été constitué, qui a été considéré par la suite comme l'échantillon complet. Sur ce jeu épuré on a défini un sous échantillon de données dans lequel certaines parcelles ont été éliminées à cause de dégâts importants d'ordre biotiques, c'est-à-dire dus à des causes autres que la sécheresse : on le désignera par la suite comme l'échantillon sans dégât. Ainsi les données observées sur l'ensemble des parcelles d'Alkama en 2006 et 2007 ont été éliminées à cause d'une attaque généralisée des chenilles mineuses de l'épi. Les données de Koyria 2005 ont également été écartées du fait d'une attaque par les criquets et d'autres insectes.

C'est le jeu de « données sans dégât » qui sera considéré et confronté aux simulations du modèle pour évaluer sa qualité prédictive et l'impact du climat sur le rendement. De fait les modèles habituels ne peuvent tenir compte de ces aléas.

### II.1.ii. Adaptation du modèle SarraH

#### a) Adaptation aux variétés locales :

Des résultats d'essais agronomiques conduits en 2002 et 2003 au Centre Régional AGRHYMET (Alhassane, 2008) ont été utilisés pour ajuster certains paramètres du modèle SARRAH aux variétés locales et aux conditions de culture paysannes du Niger, à savoir : faibles densités, sol peu fertile, et très faible apport de fumure, ce bien évidemment en conditions pluviales strictes (pas d'irrigation). De fait les essais

comparaient pour différentes dates de semis, différentes densités de semis et différentes doses d'azote, les développements des trois variétés de mil les plus répandues au Niger et en particulier dans la zone de Niamey : variétés HKP, ZATIB et MTDO. Pour être précis les variétés HKP et MTDO sont des variétés épurées et légèrement améliorées issues, respectivement, des variétés paysannes « Hainy Kirey » (variété précoce de cycle d'environ 90 jours) et « Somno » (variété semi-tardive de cycle de 120 jours ou plus), et elles leur sont très proches.

L'adaptation du modèle a été faite avec le souci d'homogénéiser les paramètres au maximum, et seuls quelques paramètres diffèrent selon la variété et les conditions de culture considérées. Certains paramètres variétaux ont ainsi été calibrés en relation aux observations. On peut les considérer comme des paramètres génétiques différenciant les variétés :

- les lois (allométriques) de répartition des biomasses entre les feuilles et les tiges ;
- les sommes de températures (sommes de degrés-jours) qui sont propres aux différentes phases du cycle, en particulier la phase végétative ;
- les paramètres de sensibilité à la photopériode ;
- le potentiel de rendement.

#### b) Adaptation aux conditions culturelles locales :

Pour tenir compte des conditions de culture, et en premier lieu de la fertilité de la parcelle (découlant du sol et des apports), on a la possibilité de considérer des valeurs différentes du coefficient ( $\epsilon_b$ ) d'efficacité de conversion de la lumière interceptée : de fait en situation peu fertile l'activité photosynthétique est moins importante et on peut traduire cela dans le modèle par une valeur moins élevée du coefficient de conversion (Cf. deliverable 3.1.c, chapitre « Assessment »). En situation peu fertile on aura donc un accroissement potentiel de biomasse plus faible tout au long du cycle. Sachant que le modèle estime le rendement en relation à cet accroissement de biomasse et à une valeur potentielle de rendement (qui a été laissée invariante pour chacune des variétés quelque soit les conditions culturelles car ce paramètre est considéré comme de nature génétique), un des effets de la réduction de l'accroissement de biomasse sera donc un rendement simulé plus faible. Ainsi la réduction du rendement est bien simulée comme une conséquence d'une réduction de la capacité de la culture à convertir en biomasse globale l'énergie lumineuse.

En pratique nous avons retenu deux scénarios de simulation que l'on définira comme « fertile » et « non fertile », ce en relation à deux valeurs du coefficient de conversion. L'optimisation de ces deux valeurs en relation à un état de fertilité, et aux variétés, s'est faite sur la base des résultats des expérimentations 2002.

La figure 2 illustre les résultats des ajustements obtenus pour les variétés HKP et MTDO par rapport aux observations des essais agronomiques reproduisant des conditions paysannes (conditions pluviales ; densités faibles ; avec ou sans apport de fertilisant). L'essai s'est aussi effectué sur des dates de semis différents pour capter notamment le caractère photopériodique de ces variétés.

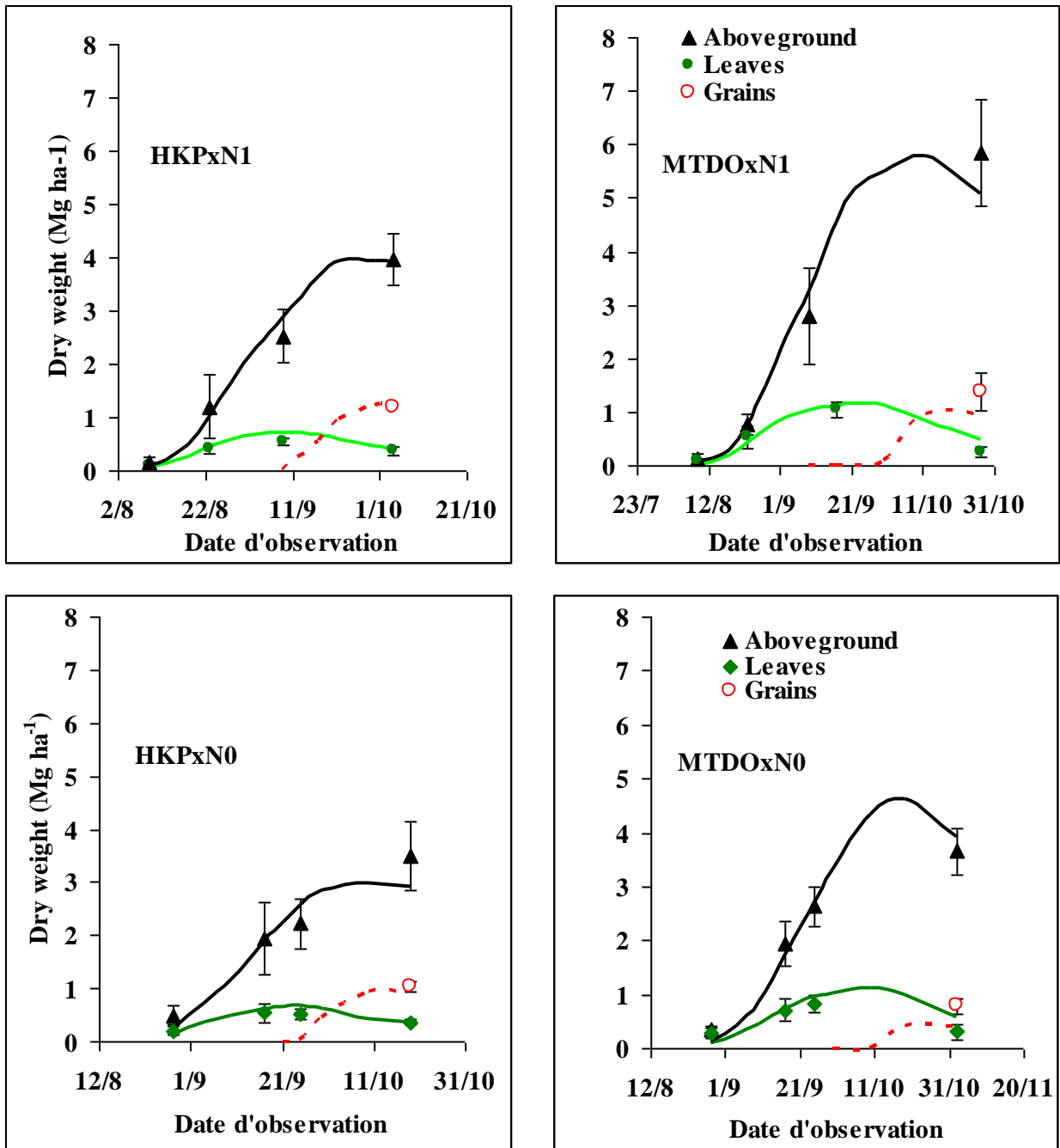


Figure 2 : Adaptation du modèle SARRAH aux variétés de mil HKP et MTDO cultivées en conditions fertilisées (en haut) et non fertilisé (en bas). Essais AGRHYMET, 2002.

Sur ces 4 exemples on constate que le modèle reproduit bien les dynamiques d'évolution des biomasses foliaires et aériennes totales (tiges+feuilles), et estime relativement bien les rendements grains, ce pour les 2 variétés HKP et MTDO.

Les paramétrages retenus permettent donc au modèle de rendre compte de façon satisfaisante des différentes situations paysannes qui ont été reproduites dans les essais (variétés x dates de semis x conditions de fertilité).

### II.1.iii. Scénarii de simulations des situations paysannes

#### a) Données climatiques :

Les données pluviométriques journalières mesurées dans chaque village par les pluviographes de l'IRD ont été utilisées. Les autres données climatiques nécessaires au fonctionnement du modèle (température et humidité de l'air, vent, radiation solaire) ont été obtenues auprès du Centre Régional AGRHYMET et de l'ICRISAT qui possèdent des stations météorologiques automatiques respectivement à Niamey et à Katanga non loin de Banizoumbou. En 2004 et 2005 les données de Niamey (Aghrymet) ont été utilisées pour les villages situés au sud de Niamey, et celles de Katanga (ICRISAT) pour les villages situés au nord de Niamey (Fig. 1). En 2006 et 2007 seules les données d'Agrhymet étaient disponibles et elles ont donc été utilisées pour les 10 villages.

#### b) Conditions agronomiques :

Les variétés, les dates et densités de semis (nombres de plants à l'ha) ainsi que les caractéristiques hydriques des sols observés sur les parcelles paysannes ont été spécifiés au modèle pour effectuer les simulations.

Les paramétrages obtenus pour la variété *HKP* ont été appliqués aux parcelles paysannes semées avec la variété *Hainy Kirey* et ceux obtenus pour la variété *MTDO* aux parcelles semées avec la *Somno*.

Pour se situer dans des conditions reproductibles de simulation/prévision des rendements à l'échelle régionale nous avons considéré que les sols étaient invariant à l'échelle du village, ce qui n'est pas la réalité mais serait impossible à documenter aux échelles régionales.

#### c) Dates et vagues de semis :

Nous avons considéré uniquement (pour l'étude présentée ici) les semis réussis.

En cas de semis à sec, c'est-à-dire de semis effectué bien avant les premières pluies (ce qui est une pratique très répandue en sone sahélienne), nous avons considéré comme « date de semis effective » celle de l'occurrence de la pluie qui a provoqué la germination et le démarrage du cycle.

Quand les dates de semis étaient très proches (moins de 10 jours), on les a regroupées en une seule vague de semis rapportée à la première date qui en général correspond à l'occurrence d'une pluie la veille ou le jour même. De fait il faut noter que dans cette zone du Niger, les paysans sèment généralement dès la première pluie importante recueillie en début de saison et que l'ensemble des parcelles du village peut être semé en moins de 5 jours.

Ainsi selon notre représentation de la réalité on se retrouve au niveau d'un village pour une année donnée avec de une à quatre vagues maximum de semis.



d) Scénarii de simulation :

Un scénario de simulation regroupe donc l'ensemble des parcelles d'un village ayant une même date/vague de semis et une même variété. Ainsi, un à quatre scénarios de simulations ont été obtenus par village et par année.

e) Gestion des résultats de simulation :

Par la suite, des moyennes pondérées ont été calculées en fonction du nombre de parcelles par scénario de simulation, pour obtenir une seule valeur simulée par année et par village. Ce sont ces valeurs qui sont confrontées aux observations.

## II.2. Activités menées au Sénégal

### II.2.i. Suivis-enquêtes en milieu paysan

Des suivis-enquêtes ont été menés dans le Département de Diourbel (Sénégal) au niveau de 6 villages en 2006 et 5 en 2007 (et 2008) (Fig. 3) : il s'agit des villages de Bakfassagal, Taiba Sérère, Djakaël Dig, Mbaena Wolof, Thiock Niang, et Djigueul (2006 uniquement). Les protocoles sont quasiment identiques à ceux du Niger: suivis sur 30 à 35 parcelles par village, recueil de données concernant les parcelles, le développement des cultures, les pratiques, les aléas, et au final détermination des rendements en grains au niveau de 3 placettes par parcelle.

Des suivis de même type (5 villages) ont également été effectués en 2007 (et 2008) dans le département de Kafrine. Les résultats ne seront pas présentés ici.

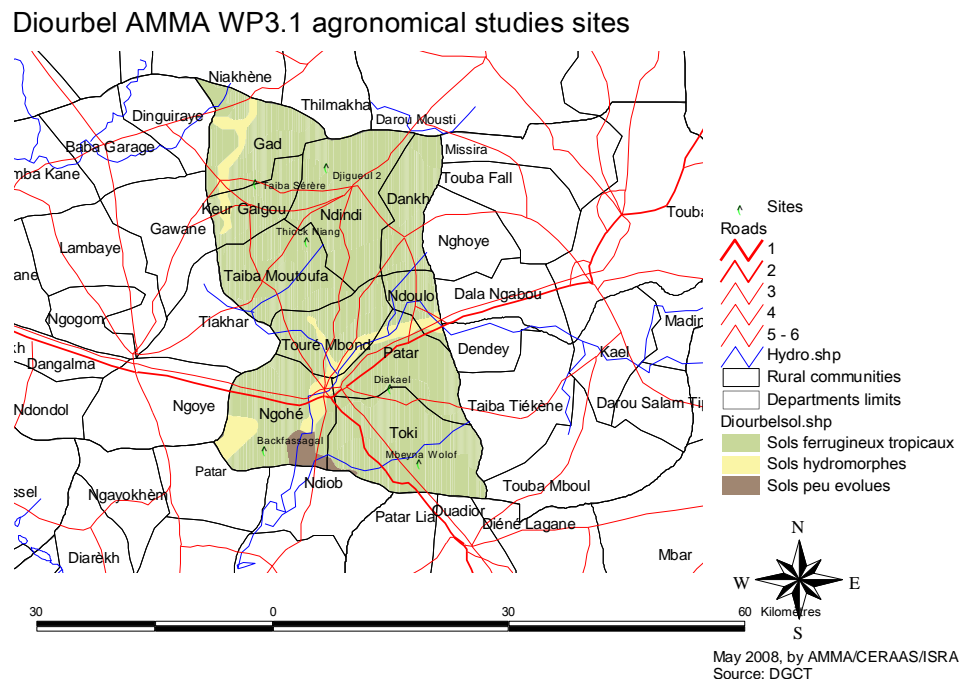


Figure 3 : Localisation des villages suivis dans le département de Diourbel, Sénégal.

Les pluies journalières ont été relevées dans chaque village par un pluviomètre manuel. Les autres données climatiques utilisées proviennent de la station météorologique officielle du Centre Nationale de Recherche Agronomique (CNRA) de Bambey, qui est situé non loin de là : à entre 30 et 60 Km à vol d'oiseau des différentes stations, à la même latitude et à la même altitude et dans le même environnement géographique. Un poste météorologique existe à Diourbel mais il ne fournit que les températures en plus des pluies.

A noter également qu'un réseau de 30 pluviomètres manuels a été installé en 2007 dans tout le département de Diourbel (en collaboration avec la Météorologie Nationale du Sénégal et les services de l'agriculture), avec l'objectif final de pouvoir prévoir les productions avec précision à l'échelle du département une fois le modèle de prévision mis au point à partir des données obtenues sur les villages suivis.

Sur le même principe qu'au Niger les données ont été vérifiées puis filtrées de façon à éliminer celles qui étaient trop fortement affectées par des problèmes phytosanitaires (ravageurs, maladie, etc..) ou accidentels, sachant que le modèle n'est pas en mesure de tenir compte de ces aléas. Ainsi par exemple les données 2006 de Mbaena Wollof et Djakaël Dig (voir en figure 9) ne peuvent être retenues pour les comparaisons avec les simulations car pratiquement toutes les parcelles ont été fortement attaquées par des sautériaux.

## **II.2.ii. Adaptation du modèle SarraH**

L'adaptation du modèle s'est faite avec le même souci de simplification et d'homogénéisation du paramétrage qu'au Niger, et en poursuivant l'idée d'utiliser à termes des jeux aussi identiques que possible pour les 4 pays dans lesquels se déroulent les suivis-enquêtes, en ne gardant des spécificités régionales que pour les caractéristiques variétales de base des variétés : sommes de températures et paramètres de sensibilité au photopériodisme en premier lieu ; relations allométriques de répartition des biomasses et potentiel de rendement en second lieu.

En milieu paysan tous les paysans de la zone de Diourbel, et plus largement de pratiquement toute la moitié nord du Sénégal, indiquent qu'ils ne cultivent désormais que du mil « Souna ». Sous cette appellation ils désignent a priori des variétés (plutôt sans doute des « populations ») personnelles (car année après année ils gardent et ressemment leur propre semences) issues de la variété améliorée Souna 3 mise au point au début des années 80 : mais il y a aussi peut-être par endroit des variétés Souna traditionnelles, variétés qui sont celles à partir desquelles le Souna 3 a été développé. Toutes ces variétés sont donc très proches les unes des autres et on considère en général qu'il s'agit de « Souna 3 ». C'est un mil de cycle court de 90 jours considéré comme non ou très peu photopériodique.

Au cours de la campagne 2007 des prélèvements de grains ont été faits dans les villages de Diourbel (et Kaffrine) afin de pouvoir étudier précisément les caractéristiques de développement des variétés paysannes dans le cadre d'essais agronomiques et détecter si il y avait des différences entre les variétés des différents villages. Des essais agronomiques de caractérisation avec 3 dates de semis ont ainsi été mis en place lors de l'hivernage 2008 au CNRA Bambey pour caractériser les sommes de températures, paramètres de sensibilité au photopériodisme, relations allométriques (nombreux prélèvements de biomasses) et rendements potentiels. Ces

essais sont en cours de dépouillement et nous ne disposons pas encore des données précises recherchées.

Dans le cadre de l'étude présentée ici nous avons donc repris en grande partie, à titre provisoire, les paramètres utilisés au Niger pour le mil HKP – Hainy Kirey (cycle 90 jours), en ajustant simplement un peu les sommes de température de façon à caler les longueurs des cycles simulés sur les observations.

Indiquons aussi pour information que dans les cadres AMMA et AMMA-TTC des essais ont été menés au CNRA Bambey par le CERAAS et le CIRAD sur le bilan radiatif du mil et sa modélisation en relation à la densité de peuplement et à l'architecture du couvert. Ils sont le support d'une thèse d'un étudiant Ivoirien du CERAAS (soutenance au second semestre 2009) et feront l'objet de publications. Les résultats seront pris en compte pour améliorer certains algorithmes de SARRAH.

### **II.2.iii. Scénarii de simulation des situations paysannes**

Les informations nécessaires au modèle proviennent des suivis et/ou des informations existantes sur la région : par exemple en ce qui concerne les caractéristiques hydriques des sols sableux « Dior » qui sont dominants.

A Diourbel les semis du mil sont effectués souvent à sec dans le courant du mois de mai ou début juin. Sinon, de même qu'au Niger, et même de façon encore plus groupés car les paysans utilisent des semoirs attelés, ils s'effectuent le jour même ou dans les 2-3 jours après la première pluie qui paraît utile (au moins 15 mm en général). Pour ceux qui n'ont pas pu le faire, ou qui ont différents champs, ou dans le cas d'un échec, il y aura semis (ou re-semis) dans la période avant la seconde pluie utile, ou au moment ou juste après celle-ci. Ainsi on a de 1 à 3 vagues (et dates) de semis par village chaque année.

## **III. Résultats et discussion**

### **III.1. Analyse de la représentativité de l'échantillonnage**

Afin d'évaluer la représentativité de notre échantillon pour la région de Niamey aussi bien à l'échelle d'un village (30 parcelles) que du degré carré (10 villages), nous avons procédé au calcul des erreurs d'estimation des moyennes et variances des rendements mesurés (figure 4). On constate qu'en considérant les quatre années d'enquête, l'erreur d'estimation de la moyenne du rendement reste inférieure à 10 %, aussi bien à l'échelle du village que du degré carré dès que le nombre de parcelles est supérieur ou égal à 10. Pour l'erreur d'estimation de la variance, à l'échelle du degré carré elle est inférieure à 10 % dès que le nombre de parcelles est supérieur ou égal à 20 par village, mais à l'échelle du village, elle demeure supérieure à ce seuil quel que soit le nombre de parcelles retenues. Nous en déduisons que, par rapport à l'un des principaux objectifs de cette étude qui est de caractériser la variabilité des rendements de mil à l'échelle d'un degré carré, le nombre de parcelles que nous avons suivi par village (30) est largement suffisant. Cette conclusion peut s'étendre à la zone de Diourbel et également à toutes les autres régions d'études.

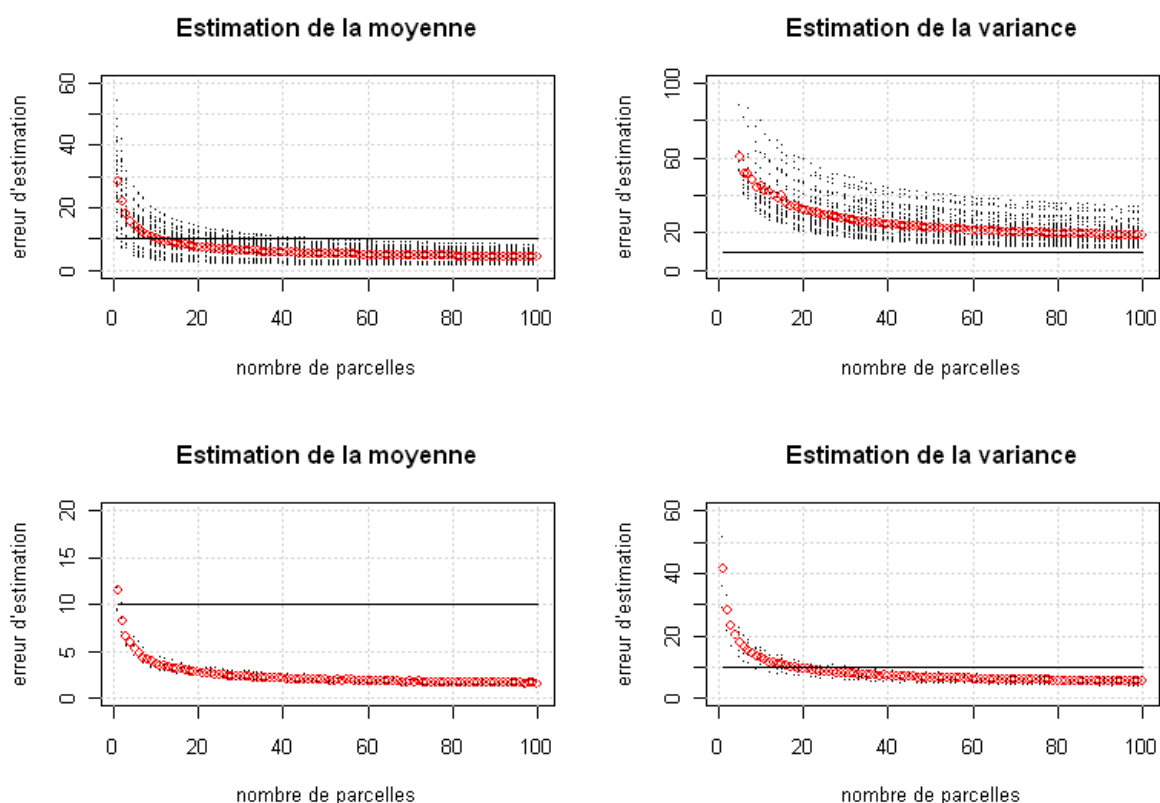


Figure 4 : Erreurs d'estimation de la moyenne et de la variance des rendements de mil aux échelles du village (en haut) et du degré carré (en bas) en fonction du nombre de parcelles suivies par village. La courbe rouge représente la moyenne des erreurs sur toutes les situations (tous villages et années confondues) et les points noirs les erreurs faites sur les situations individuelles (par villages et par années).

## III.2. Analyse de la variabilité des rendements

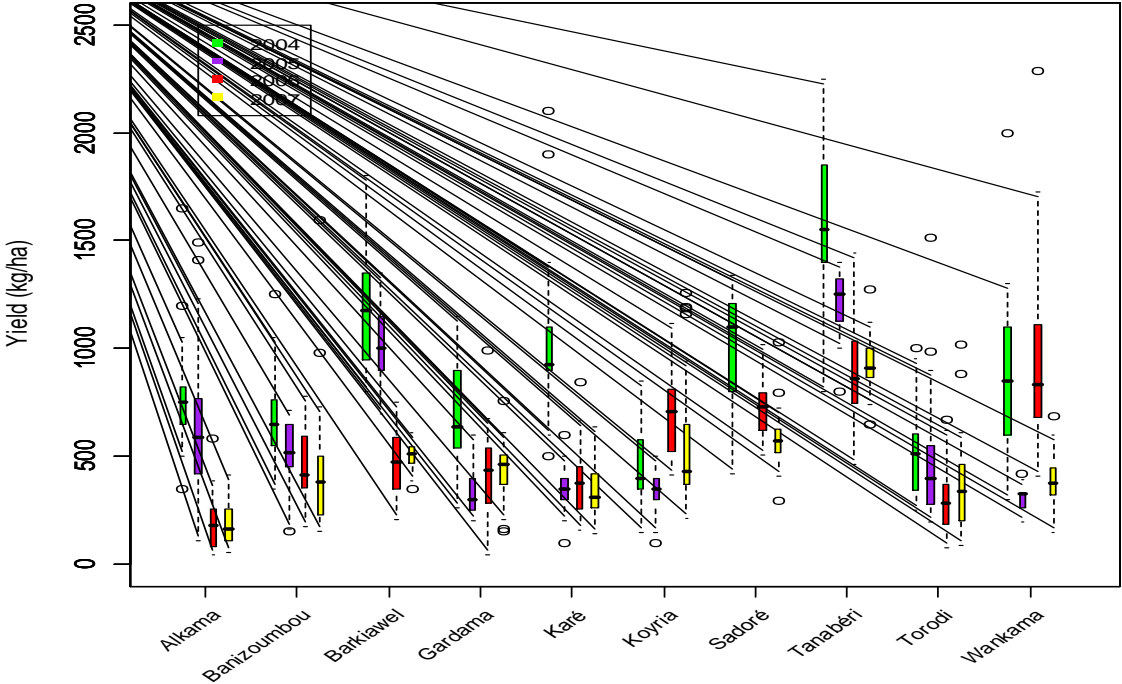
### III.2.i. Région de Niamey (Niger)

a) Regard sur la variabilité de tous les rendements :

La figure 5a illustre la très grande variabilité des rendements de l'échantillon complet au sein d'un même village. Même si l'on ne tient pas compte de quelques situations extrêmes (petits ronds), qui restent cependant acceptables sur le plan agronomique, cette variabilité est très importante. Les très faibles rendements peuvent être dus à des dégâts (insectes, maladies, champignons, ravageurs ; par exemple les attaques de chenilles mineuses) ou à des entretiens très insuffisants et préjudiciables (manque ou retard de sarclage, mauvais démariage des plants). De très bons rendements peuvent être obtenus sur des parcelles bénéficiant de bonnes conditions de fertilité du sol et d'un investissement important de la part du paysan (sarclage, entretien, bonne gestion de la fertilité sur plusieurs années successives par des parages ou apports de fumier ou de fertilisant). C'est ainsi qu'on rencontre des parcelles produisant plus de 2000 kg/ha avec les variétés locales en milieu paysan, ce qui est tout-à-fait compatible avec ce que l'on connaît des potentialités absolues

de ces variétés qui peuvent aller jusqu'à 3000 kg/ha. Dans nos essais nous avons d'ailleurs atteint 1700 kg/ha, ce qui est du même ordre de grandeur que 2000 kg/ha.

a)



b)

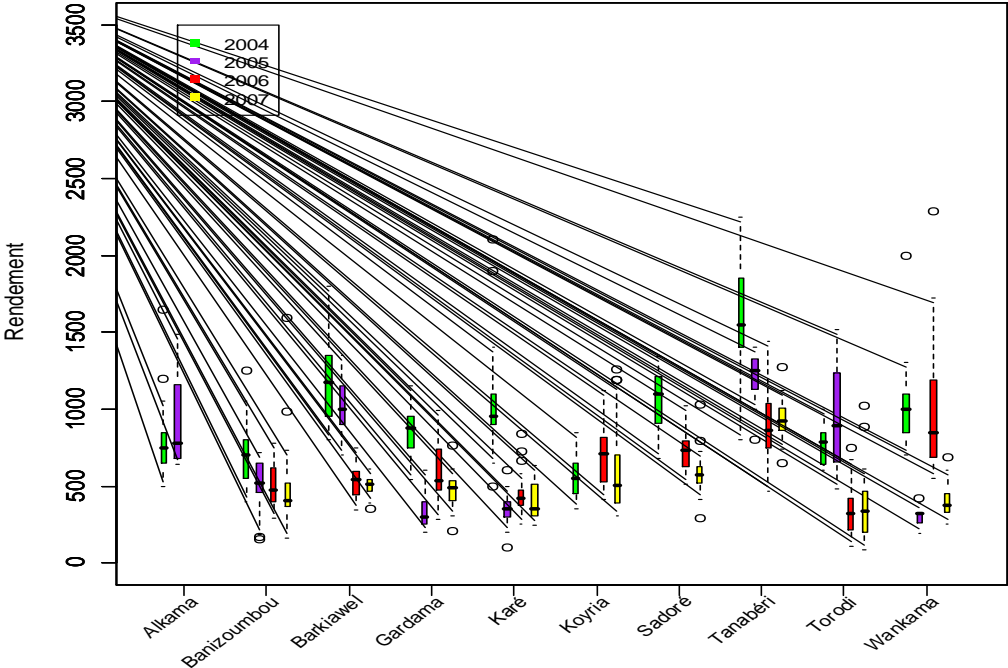


Figure 5 : Variabilités annuelles des rendements de mil dans les 10 villages de la zone du degré carré de Niamey : a) échantillon complet, b) échantillon sans dégâts

Enfin il faut aussi garder à l'esprit qu'il y a également une variabilité intra-parcellaire relativement importante qui peut expliquer (du fait des positionnements aléatoires des 3 placettes) que des parcelles peuvent peut-être apparaître plus productives qu'elles ne le sont en moyenne dans la réalité, ou l'inverse.

#### b) Variabilité des « rendements sans dégât » :

La figure 5b représente la variabilité des rendements des parcelles sans dégât, rendements qui seront utilisés dans la suite de nos analyses pour établir un lien entre les rendements observés et les facteurs climatiques à travers les rendements simulés par le modèle SARRAH. On rappelle en particulier l'abandon des données Alkama 2006 et 2007 et Koyria 2005. Les variabilités annuelles intra-villageoises sont moindres que si l'on considère toutes les parcelles, mais elles restent néanmoins très fortes.

Pour ces données sans dégât les différences observées entre les villages et pour le même village d'une année à l'autre, peuvent être principalement attribuées à la répartition spatio-temporelle des pluies. En tendance générale on peut déjà noter :

- que la variabilité des rendements des parcelles au sein de chaque village est plus grande que la variabilité des rendements moyens par village ;
- que la variabilité des rendements inter villageois est plus grande pour les années 2004 et 2005 ;
- que les rendements de 2006 et encore plus ceux de 2007 sont systématiquement les plus mauvais de tous, et que les résultats de ces deux années se détachent de ceux de 2004 et 2005 ;
- qu'un « effet village » existe a priori pour le village de Tanaberi qui a des rendements systématiquement plus élevés (nous y reviendrons par la suite).

#### c) Variabilité des pluviométries :

L'analyse des cumuls pluviométriques par village et par an (figure 6) montre que ce sont les années 2005 et 2006 qui présentent le plus d'hétérogénéité, avec un écart entre les valeurs minimum et maximum du cumul des pluies par village de l'ordre de 2,5 (259 à 661 mm), et avec la plus faible valeur de cumul pluviométrique observée en 2005 sur le village de Gardama Kouara.

Par ailleurs, si on se rapporte à l'échelle du degré carré, il n'y a qu'une faible variation inter-annuelle, de l'ordre de 10%, de la valeur moyenne du cumul des pluies (487 à 527 mm).

Aussi, au-delà du cumul c'est la répartition des pluies qui doit être analysée :

- Ainsi, en 2004, les villages de Koyria et Torodi ont eu les plus faibles rendements du fait des difficultés de démarrage de la saison. Il y a eu plusieurs resemis dans ces deux villages (au point que les villageois nous ont demandé de leur fournir des semences). Par contre dans le village d'Alkama les plants de mil ont pu résister au manque de pluie pendant 40 jours après le semis, du fait de la proximité de la nappe phréatique.

- En 2005, c'est l'arrêt précoce de la saison des pluies qui a le plus contribué à la baisse des rendements dans les villages de Banizoumbou, Gardama Kouara, Karé et Koyria. En effet, après un très bon démarrage et une évolution normale jusqu'à l'épiaison, la saison 2005 a connu une fin difficile, particulièrement au mois de septembre pendant lequel certaines localités n'ont enregistré aucune pluie significative. Or, c'est à ce moment là que les besoins en eau des cultures sont les plus élevés car on est aux stades floraison puis remplissage des grains.

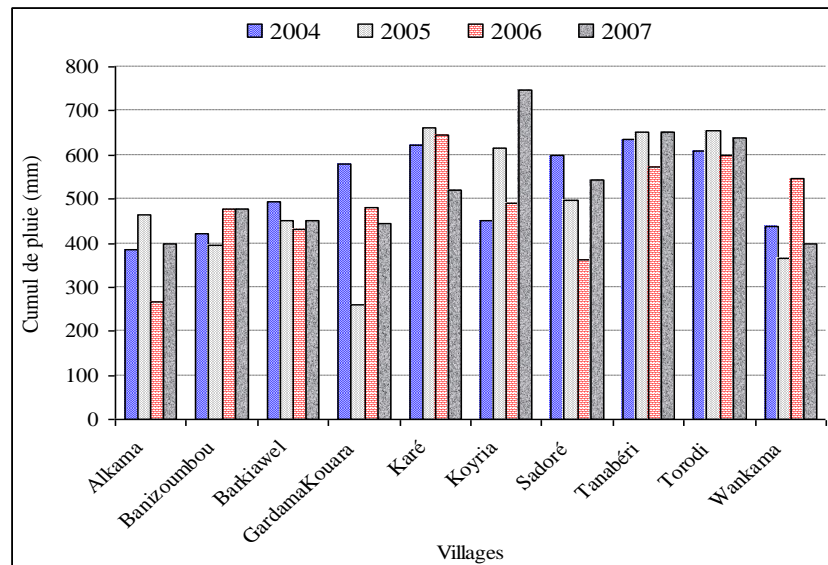


Figure 6 : Cumuls pluviométriques saisonniers dans les 10 villages du degré carré de 2004 à 2007.

- En 2006, la répartition des pluies sur l'ensemble du degré carré a été hétérogène avec des démarrages tardifs dans certains villages et/ou des fins précoces dans d'autres, et cela s'est traduit par des rendements généralement faibles.

- En 2007 deux périodes pluviométriques différentes sont selon toute vraisemblance à l'origine des mauvais rendements constatés, ce malgré le bon démarrage et les quantités globales importantes de pluies enregistrées du semis à l'épiaison. Tout d'abord il faut relever qu'il y a eu un arrêt précoce des pluies dès début septembre. Ensuite il faut souligner que la dernière décade de juillet et le mois d'août ont connu des événements pluvieux particulièrement abondants et rapprochés et l'on peut penser que cette période très pluvieuse a eu divers effets négatifs sur les cultures :

- (i) pertes par ruissellement et/ou drainage-lixiviation des rares éléments fertilisants ;
- (ii) lavages possibles du pollen si de fortes pluies se sont produites exactement lors de cette phase : cela peut conduire à une diminution très importante du nombre de grains et donc du rendement ;
- (iii) asphyxies racinaires préjudiciables au bon fonctionnement physiologique (en tant qu'espèce particulièrement adaptée à la sécheresse, le mil est sensible aux excès d'eau dans le sol) ;
- (iv) développements plus importants de problèmes phytosanitaires (maladies, champignons, insectes) dont les incidences ont peut-être été sous-estimées lors des

suivis et par suite certaines données n'ont pas été écartées alors qu'elles étaient affectées de dégâts ;

(v) et faible rayonnement global du fait de l'ennuage. Mais notons que le modèle SARRAH peut rendre compte a priori de ce facteur négatif.

Pour se convaincre des effets potentiellement très négatifs d'une forte pluviométrie sur le mil on peut aussi se référer aux rendements 2008 obtenus à Diourbel qui sont présentés à titre d'information en figure 9 : ils sont particulièrement mauvais alors que les pluviométries ont été importantes en août.

d) Autres causes de variabilité des rendements :

Toutefois le facteur pluviométrique (en particulier le cumul saisonnier) ne suffit bien évidemment pas à lui seul à expliquer les différences de rendements du mil. En effet, d'autres facteurs comme la nature du sol (texture, profondeur de la cuirasse ou de la nappe), la fertilité de la parcelle, les pratiques culturales (apports organiques et minéraux, lutte contre les adventices), les variétés (Hainy Kirey vs Somno), et sans doute aussi des aspects phytosanitaires (même si on a essayé d'écarter les plus visibles) ont joué sur les rendements. L'analyse des anomalies standardisées entre rendements et cumuls pluviométriques par village (figure 7) illustre cette réalité tout autant que le simple examen des variabilités intra-villageoises (figure 5b).

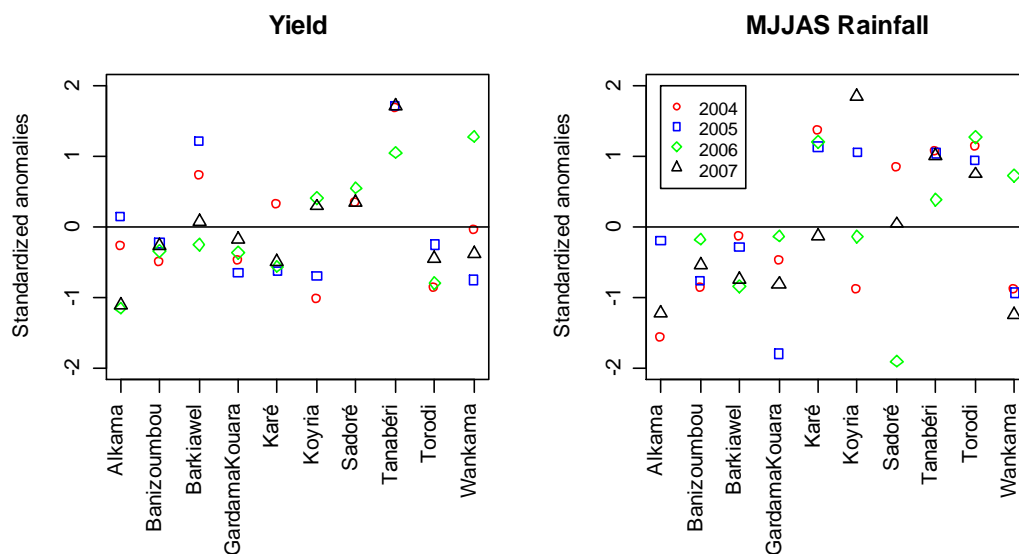


Figure 7 : Comparaison des rendements du mil et des cumuls pluviométriques saisonniers de chacun des 10 villages, par rapport aux moyennes des quatre années sur le degré carré.

Le village de Koyria se caractérise par des sols peu profonds et rocailleux en surface, ce qui peut causer des échecs de semis en début de saison, ou aggraver l'effet des épisodes sans pluies par rapport aux autres villages.



Les rendements du village de Tanabéri ont toujours été plus élevés que ceux des autres villages, et sont donc bien supérieurs à la moyenne sur le degré carré. Ceci s'explique d'une part par la localisation de ce village dans une zone relativement plus pluvieuse (figures 6 et 7), d'autre part sans doute par une meilleure fertilité des sols. La zone est en effet relativement plus boisée et plus récemment mise en culture. On peut donc penser que les sols ont été moins érodés et moins épuisés.

En ce qui concerne les variétés les paysans n'utilisent la variété tardive de mil Somno (120 jours ou plus) qu'à Torodi, et dans tout au plus 1/6<sup>ième</sup> des parcelles de Banizoumbou. Partout ailleurs, c'est la variété Hainy Kirey (90 jours) qui est semée. Du fait de son cycle tardif, la variété de mil Somno est la dernière à être récoltée, elle a plus de risque à être affectée par un arrêt précoce des pluies, se traduisant par un stress hydrique de fin de cycle plus marquée. Dans le zone du degré carré, cela pourrait expliquer, en plus du facteur sol, que les rendements observés à Torodi, où seule cette variété a été observés, soient toujours inférieurs à la moyenne du degré carré, malgré sa position relativement favorable sur le plan du cumul pluviométrique.

En ce qui concerne les pratiques culturales, et notamment les modes de gestion de la fertilité des parcelles, les analyses statistiques que nous avons effectuées n'ont pas révélé de différences significatives entre les rendements des parcelles en relation à ces modes de gestion. Bien que cela puisse sembler étonnant il faut cependant considérer, d'une part que les écarts entre les productivités potentielles des parcelles sont intrinsèquement assez faibles du fait des modes de gestion extensifs de la fertilité, d'autre part que les effets des autres facteurs pouvant affecter les rendements (en premier lieu climatiques mais aussi la nature des sols, l'entretien des parcelles, les petits aléas, etc.) et leurs multiples interactions, contribuent à brouiller les choses et à masquer les différences. Rappelons aussi ici que notre objectif premier était de capter la variabilité des rendements et de pouvoir faire la part entre les déterminants climatiques et les autres, et non pas de chercher à quantifier et expliquer les effets de tous les facteurs. Pour arriver à cela il aurait fallu construire des échantillonnages spécifiquement étudiés à partir d'une connaissance approfondie des réalités agronomiques en veillant à avoir des nombres suffisants de différentes situations bien définies et représentatives des réalités et facteurs à analyser. Cela aurait impliqué un nombre bien plus important d'observations, beaucoup plus de précision dans les suivis, et des mesures (analyses de sol et plantes) pour pouvoir apprécier quantitativement la fertilité.

Les paysans, dans la mesure de leurs possibilités, apportent de la fumure organique ou minérale dans leurs parcelles, mais le mode d'apport diffère selon le type de fumure. Ainsi, si la fumure organique est appliquée sous forme de fumier ou de parbage, disséminé sur la parcelle, la fumure minérale est appliquée à des doses minimales au poquet, généralement au moment du semis (mélangée avec les semences). Les villages de Alkama et Sadoré diffèrent des autres par le mode de parbage effectué dans les parcelles. En effet, les Touaregs et les Peulhs, habitant respectivement ces deux villages, construisent leurs habitations dans les parcelles cultivables et y parquent les animaux tout autour. Ils déplacent ces habitations environ tous les deux ans vers un endroit moins fertile du champ, libérant ainsi la partie redevenue fertile (après parcages consécutifs) pour la culture. Dans les autres villages, où la population est en majorité Djerma, les habitations sont regroupées et les parcelles se situent autour du village. Le niveau de fertilisation et d'entretien des

parcelles est plus important à proximité du village (parcages, ordures ménagères) et a tendance à diminuer au fur et à mesure que l'on s'en éloigne.

Comme nous l'avons déjà évoqué, pour une année dans un même village les dates de semis varient peu entre elles. Selon la saison des pluies on observe une à deux vagues de semis, la première intervenant généralement après la première grosse pluie enregistrée en début de saison. Ainsi, les premières vagues de semis ont été observées à partir du 30 avril en 2004, du 03 mai en 2005, du 01 Juin en 2006 et du 29 mai en 2007. Cette pratique, commune pour tous les villages de la zone, constitue une stratégie de gestion du risque pour les agriculteurs : en cas de réussite ces semis précoces ont l'avantage de permettre aux cultures de mieux valoriser le peu de fumure disponible dans les parcelles (car il y a une minéralisation rapide de l'azote organique suite aux premières pluies), d'amoindrir la compétition avec les mauvaises herbes en les prenant de vitesse, et de permettre aux plants de mieux s'enraciner avant les fortes pluies. Par ailleurs, les variétés cultivées par les paysans sont toutes photopériodiques, avec une période de floraison coïncidant avec la date moyenne de fin de saison quelle que soit la date de semis, et un semis réalisé tôt leur permet donc d'avoir une durée de végétation plus longue, et donc un potentiel productif plus élevé. Enfin il faut considérer que l'échec éventuel d'un semis précoce n'est pas grave en soit pour les agriculteurs car la semence de mil ne coûte pratiquement rien (2-3 kg à l'hectare ; prix nul – propre semence – ou très réduit : de l'ordre de 200 à 400 FCFA/kg), et le semis ne représente pas non plus un travail trop important. Ils n'hésitent donc pas à semer au plus tôt leurs variétés traditionnelles pour tenter de profiter au mieux de la saison.

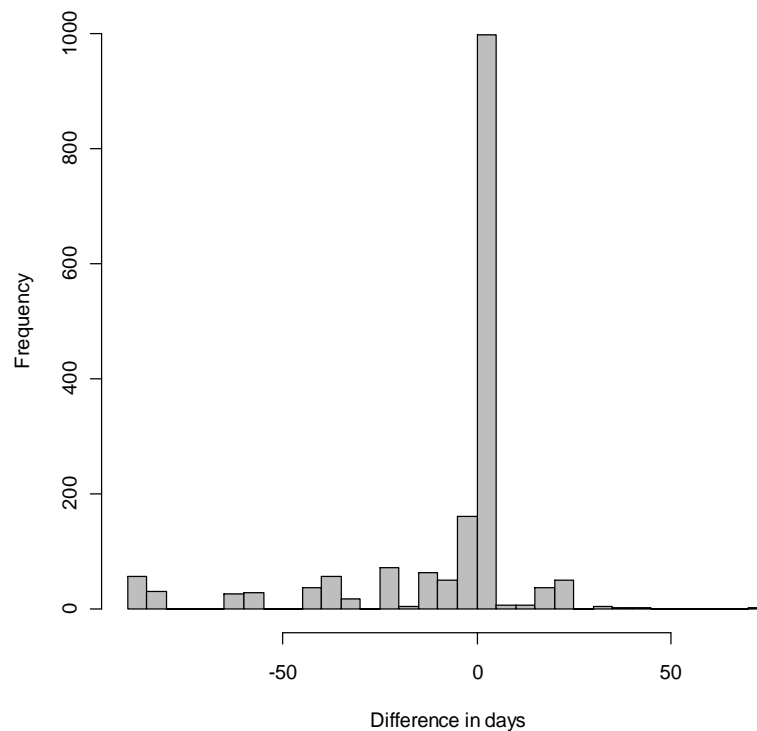


Figure 8 : Distribution des écarts des dates de semis observées et des dates de début de saison calculées en 2004, 2005, 2006 et 2007 pour les dix villages de la zone du degré carré de Niamey.

Comme l'illustre la figure 8, les dates observées de semis réussies sont généralement identiques ou plus précoces, jusqu'à plus de 80 jours, à celles calculées par la méthode de Sivakumar (1988), qui estime les dates optimales de semis, sans risque de faux départ, en fonction du démarrage de la saison pluvieuse au Sahel : selon cette méthode on considère qu'il y a semis au premier jour d'une séquence humide de 2 jours ou plus cumulant au moins 20 mm sans être suivi d'une séquence sèche de plus de 7 jours ( à partir du 1er mai), Les dates des semis observées après cette date seuil sont généralement celles effectuées lors de la deuxième ou troisième vague de semis. Dans cette zone il n'y a pas ou très peu de préparation du sol et les semis s'effectuent sur une période de 2 à 4 jours pour l'ensemble des parcelles en fonction de la main d'œuvre, de l'humidité des sols et des superficies à emblaver. Par exemple lorsque la « pluie de semis » est importante et/ou qu'elle est très rapidement suivi par une seconde pluie on observe une seule vague de semis sur le village

### III.2.ii. Département de Diourbel (Sénégal)

#### a) Variabilité des rendements :

Les variabilités intra-villageoises des rendements paysans observés dans les villages de Diourbel en 2006, 2007 et 2008 sont présentées à la figure 9. Les rendements 2008, qui ne seront pas analysés ici, sont présentés pour illustrer l'effet négatif possible d'une pluviométrie abondante. Les résultats 2006 des villages de Mbaena Wollof (MBW06) et Djakael Dig (DDG06) sont affectés par une attaque massive de sautériaux et ne seront pas considérés pour les comparaisons avec les simulations.

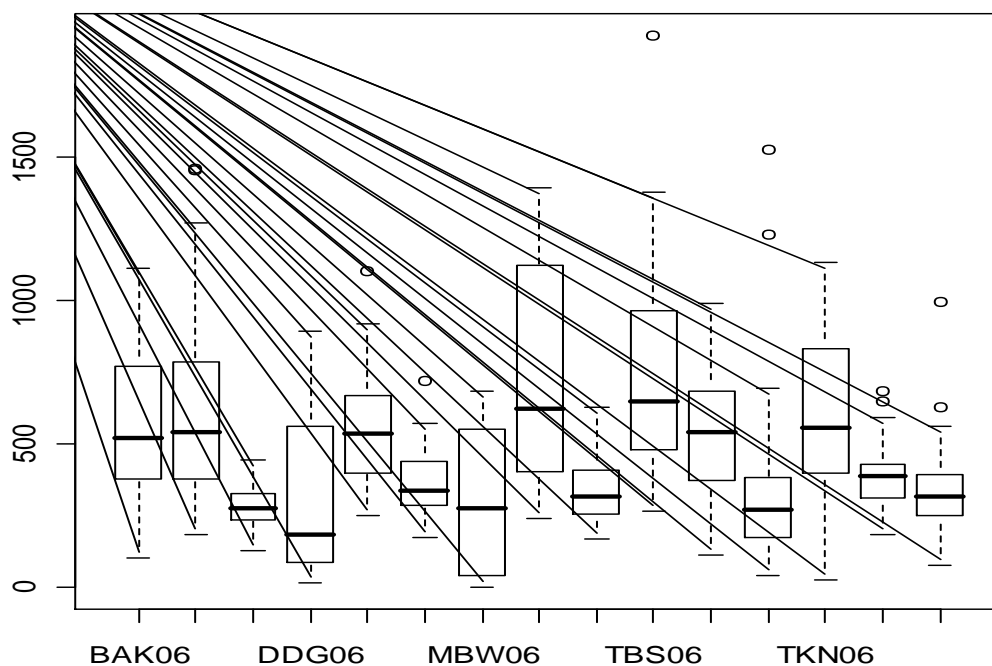


Figure 9 : Variabilités annuelles des rendements de mil dans les villages de Diourbel en 2006, 2007 et 2008 (échantillon complet).

On constate que les rendements sont faibles dans l'ensemble (plus faibles en moyenne que sur le carré Niamey), avec surtout relativement peu de variation (en terme de kg) entre les sites et les années : on n'observe un rendement moyen supérieur à 700 Kg que dans deux villages (Taiba Sérère en 2006 avec 741 Kg ; Mbaena Wollof en 2007 avec 734 Kg), et supérieur à 600 Kg que dans 5 village-année sur 9 possible (en ne considérant pas les deux situations attaquées par des sautériaux).

b) Variabilité des pluviométries :

Les pluviométries sont présentées en figure 10. Leurs principales caractéristiques à relever sont :

- 2006 : sur le plan du cumul c'est l'année la moins pluvieuse, mais les différences entre les 3 années sont faibles : 446 mm en 2006, 510 mm en 2007 et 540 mm en 2008 en moyenne sur nos villages, alors que la moyenne de Diourbel sur les 30 dernières années est de 463 mm. La répartition (illustrée en figure 10 pour 3 villages) indique un démarrage plutôt précoce (mi-juin) mais avec de faibles précipitations jusqu'à mi-juillet qui ont engendré des échecs et des re-semis à Djakael Dig et Mbaena Wollof : ainsi les levées ont pu avoir lieu de façon groupées dans les jours suivant la première pluie utile du 16 juin à Bakfassagal, Taiba Sérère et Thiock Niang (majorité de semis en sec et reste des semis en 2-3 jours) alors qu'à Djakael Dig on a eu 3 vagues de levées (après pluie du 16 juin, avec de nombreux échecs ; puis après pluie du 15 juillet puis fin juillet et début août) et qu'à Mbaena Wollof les paysans ont du attendre début août. Les précipitations ont été plus importantes fin août et début septembre mais avec des disparités entre les villages.

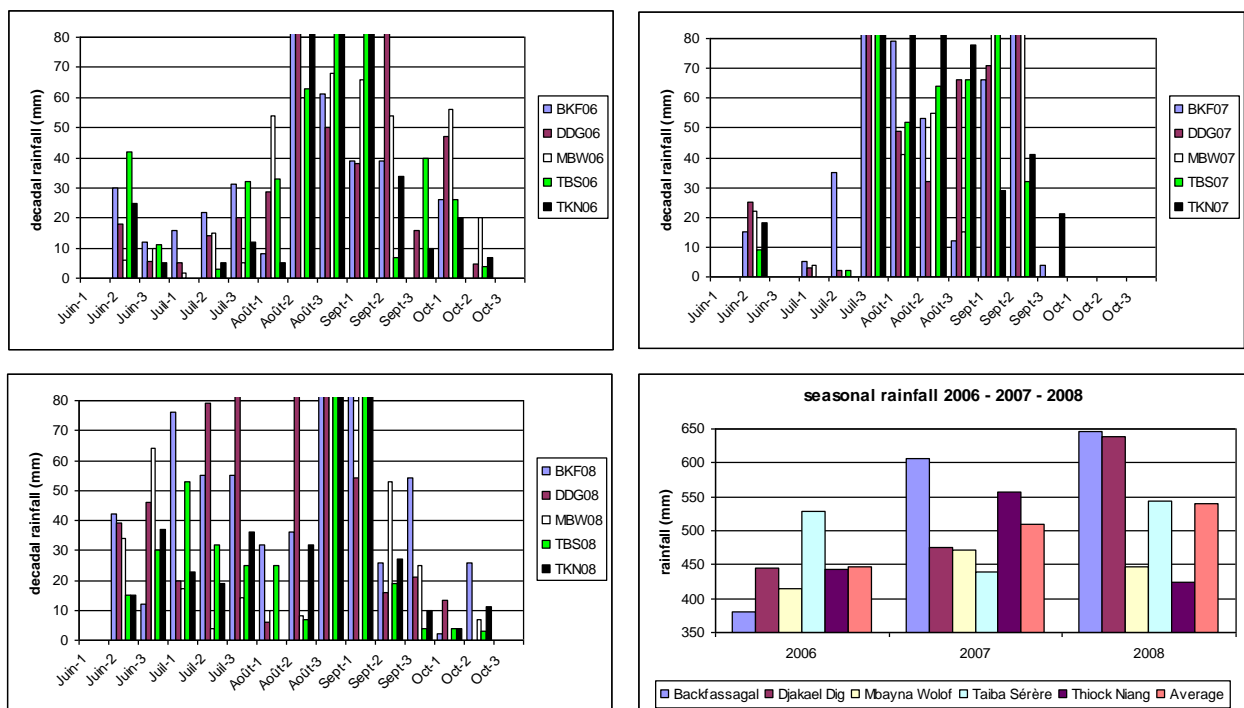


Figure 10 : Pluviométries décadaires et annuelles 2006, 2007 et 2008 des 5 villages suivis à Diourbel. Les valeurs ont été bornées à 80 mm par décade de façon à faire ressortir les différences.

- 2007 : l'hivernage s'est caractérisé par un « faux » démarrage mi-juin suivi d'une longue pause jusqu'à mi-juillet. Par la suite la pluviométrie a été plutôt importante. Une première vague de levée a eu lieu dans tous les villages après la première pluie du 13 ou du 14 juin (sauf à Taiba Sérère qui n'a reçu alors que 9 mm), mais ces cultures ont échoué. Les secondes vagues de levées ont eu lieu à Bakfassagal après la pluie du 17 juillet et ailleurs après des pluies des 23, 24 et/ou 25 juillet, et les cultures ont alors pu aller au bout.

Par comparaison l'hivernage 2008 apparaît à la fois comme plus régulier, avec un démarrage précoce des cultures mi-juin, et plus abondant.

### III.3. Rendements moyens villageois simulés par SARRAH

#### III.3.i. Région de Niamey

Les résultats (Fig. 11) montrent qu'à l'échelle du degré carré, les fourchettes de variation des rendements simulés avec les hypothèses de parcelles fertiles ou non fertiles sont proches de celles des rendements observés en 2004 et 2005, surtout pour les simulations « non fertiles ». Cependant, pour 2006 et 2007, les résultats obtenus avec le modèle sont nettement supérieurs aux valeurs observées (Fig. 11).

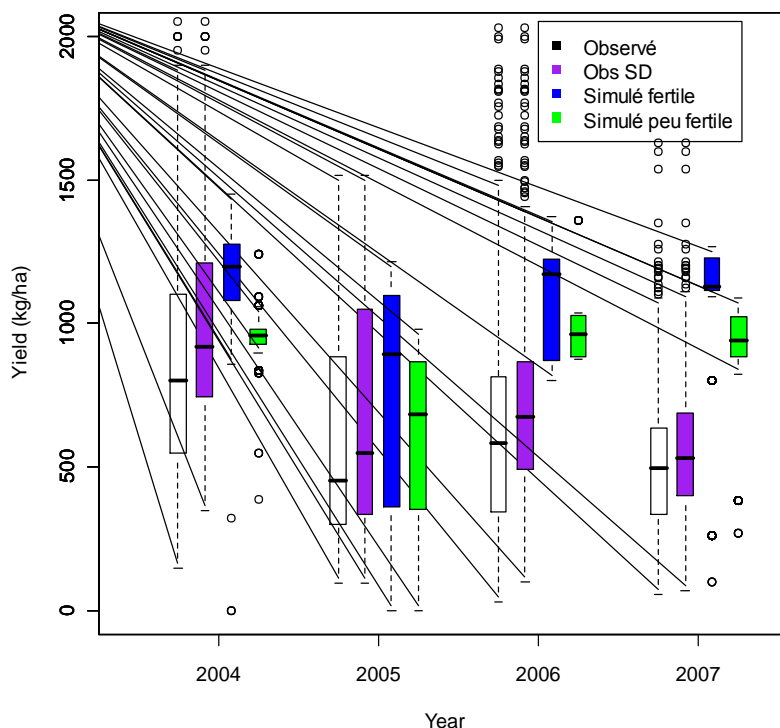


Figure 11 : Comparaison entre les rendements moyens observés avec dégât et sans dégât (Obs SD) et ceux simulés (avec ou sans fertilisation) à l'échelle du degré carré de Niamey.

Notons par ailleurs que bien que le scénario de simulations « fertile » surestime systématiquement les rendements moyens, il capte mieux la variabilité des rendements moyens entre villages pour chaque année. Par conséquent, ce scénario

devrait être plus pertinent au regard de l'objet d'étude (ie : analyse des risques et/ou estimation des rendements moyens à l'échelle régionale) après correction de ce biais systématique.

L'analyse de corrélation entre rendements observés et simulés montre logiquement une relation bien plus étroite ( $R^2=0.52$ ) pour les années 2004 et 2005 que pour 2006 et 2007 ( $R^2=0.13$ ) (Fig. 12).

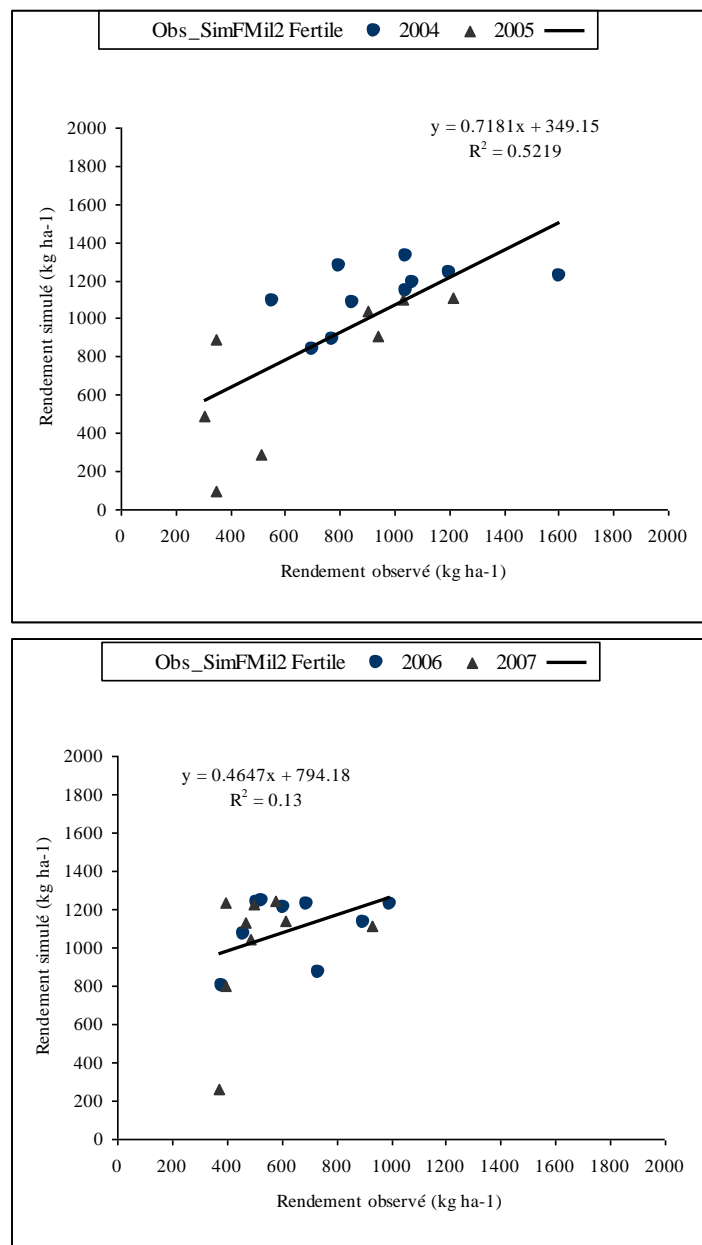


Figure 12 : Relations entre rendements moyens de mil observés et simulés par le modèle SARRA-H à l'échelle du degré carré de Niamey.

La différence de performance du modèle entre ces deux groupes d'années peut s'expliquer par deux phénomènes :

- vraisemblablement une mauvaise prise en compte d'un déficit hydrique de fin de cycle en 2006 et 2007, car c'est ce qui a semble-t-il été observé sur le terrain par les observateurs (observation visuelle rapportée) ;
- une plus faible variation des rendements moyens villageois sur les deux dernières années, qui réduit par défaut la relation (d'environ 300 à 1800 kg/ha en 2004-2005, et de 400 à 1100 kg/ha en 2006-2007).

En examinant les sorties du modèle, il s'avère que pour ces deux années, les réserves hydriques des sols simulées par le modèle restent très importantes en début de phase de floraison et satisfont la demande hydrique des plantes durant la période de remplissage des grains, ce malgré l'absence totale de pluies sur une longue période. Cette divergence entre la satisfaction en eau simulée des plantes et les observations terrains où les plantes semblaient sous stress, ainsi que des rendements observés plus faible, peut s'expliquer par différents facteurs/processus :

- une sous-estimation des phénomènes de ruissellement, qui entraîne une sur-estimation par le modèle du stock d'eau du sol à floraison ;
- une sur-estimation de l'enracinement de la culture : de fait le Mil étant une espèce sensible à l'excès d'eau, l'on peut supposer que les développements racinaires ont été réduits lors des phases très pluvieuses de juillet et août.

Ainsi on aurait une moins grande disponibilité en eau que ne le simule le modèle du fait de « réservoirs sol » moins remplis (effet du ruissellement) et/ou moins profonds (faible développement racinaire).

Pour tenir compte, même grossièrement de ces processus, des séries de scénarios de simulation ont été effectués avec différentes réserves utiles, profondeur de sols, seuils et pourcentages de ruissellement (Fig. 13).

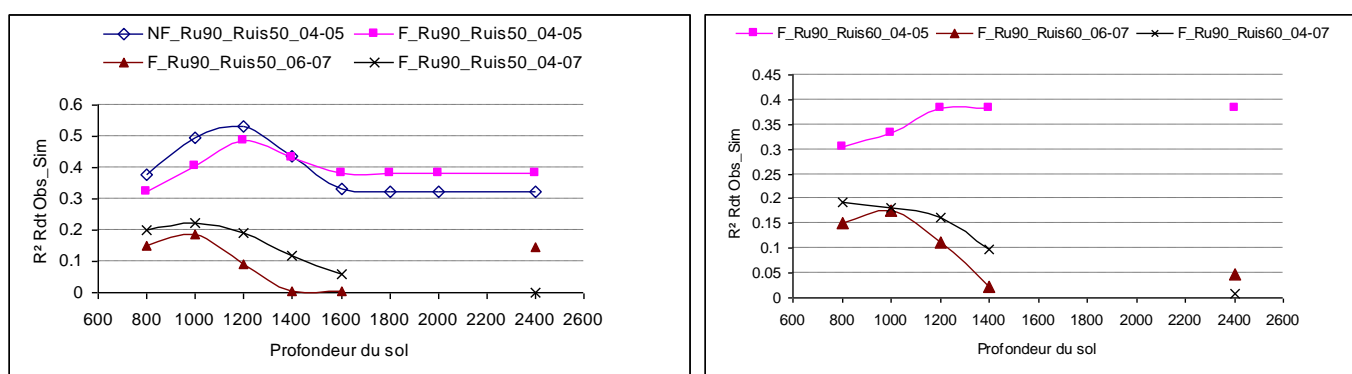


Figure 13 : Relations entre rendements moyens observés et simulés à l'échelle du degré carré de Niamey en fonction de la profondeur de sol disponible et du ruissellement : à gauche avec un pourcentage de ruissellement de 50% pour les deux séries d'années et situation de fertilité ; à droite avec un pourcentage plus élevé.

Les résultats de ces analyses n'ont cependant pas permis d'améliorer clairement les corrélations pour 2006 et 2007, ni de mettre en évidence des tendances claires. Il est

intéressant de noter que la profondeur du sol donnant les meilleures relations est une profondeur intermédiaire (120 cm), alors que le mil peut s'enraciner jusqu'à plus de 2 m de profondeur. En l'absence de connaissance précise des natures des sols, de leur spécificité éventuelle (cuirasse, etc.), et des profondeurs d'enracinement, il semble que cette profondeur moyenne est la plus opérationnelle pour l'ensemble du degré carré.

Nous continuons à travailler à explorer les rangs des variables afin de mieux comprendre et nous rapprocher de la réalité. En ce qui concerne le ruissellement nous voulons en particulier introduire des fonctions de ruissellement plus complexes tenant compte de l'antériorité des pluies (Casenave et Valentin, 1989). Nous étudions aussi l'introduction dans le modèle d'un processus de blocage/réduction de la vitesse d'enracinement en relation à des situations d'excès en eau.

### III.3.ii. Région de Diourbel

Les résultats des simulations effectuées pour 2006 et 2007 pour les villages de Diourbel sont présentés en figure 14. Ces résultats sont décevants : nous avons essayé plusieurs combinaisons de paramètres mais aucune n'a permis d'obtenir ne serait-ce que des résultats moyens pour les 2 années ensemble.

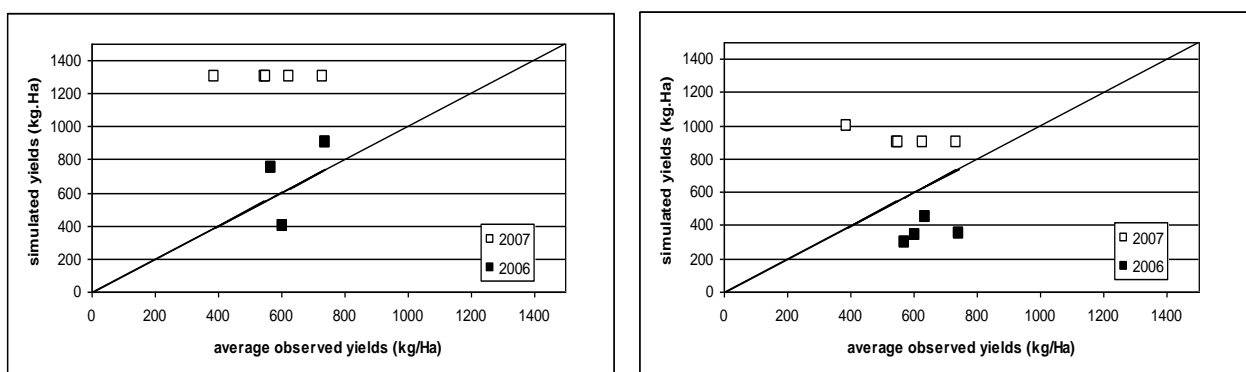


Figure 14 : Comparaisons entre rendements moyens villageois observés et simulés pour les villages de Diourbel en 2006 et 2007. La figure de gauche correspond au jeu de paramètres qui donnent le meilleur résultat pour 2006 ; la figure de droite au jeu qui donne le meilleur résultat d'ensemble.

En partant des paramétrages de Niamey (HKP - situation non fertile), même si l'on réduit encore le coefficient de conversion et d'autres paramètres tels que les taux d'assimilation, on n'arrive pas pour 2007 à ramener les valeurs simulées au niveau des observations. De fait le modèle ne simule aucun stress hydrique et cela est logique compte tenu de la pluviométrie abondante des mois d'août et septembre.

Nous en sommes donc réduits, comme pour le cas de la région de Niamey, à nous interroger sur les raisons expliquant ces rendements particulièrement réduits en 2007 : ruissellements bien plus importants que ceux simulés par le modèle, développements racinaires réduits, perte de pollen, ou dégâts phytosanitaires insuffisamment évalués ? De même nous poursuivons l'exploration de ces hypothèses.



### III.4. Recherche statistique de déterminants des rendements

Dans le but d'identifier les facteurs les plus explicatifs du rendement, une analyse de corrélation a été effectuée avec un ensemble de variables mesurées (listées au tableau 1) : la longueur du cycle (cycle), la densité de semis (Densite.Plants), la date de semis (datesemisJJ), le cumul des pluies de mai à septembre (cumul.MJJAS), le cumul des pluies du semis à la récolte (cumul.cycle), le cumul des pluies au cours des 3 premières phases de développement de la plante (cumul1, cumul2, cumul3), et au cours des 3 dernières phases (finsais), la date de démarrage (onset), la longueur de la saison des pluies (long), et les rendements simulés en situation fertilisée (rdtsimfert) ou non fertilisée (rdtsim.nonfert) par le modèle SARRA-H.

On peut voir (tableau 1) que les variables qui expliquent le mieux le rendement observé sont le cumul pluviométrique pendant les dernières phases de croissance de la culture ( $R=0.56$ ) et les rendements simulés par le modèle SARRA-H ( $R=0.46$  et  $R=0.41$  respectivement pour les situations fertilisées ou non fertilisées). Une analyse de régression multiple a permis de sélectionner les trois variables climatiques les plus explicatives du rendement observé (sans considérer les rendements simulés par SARRAH). Il s'agit du cumul pluviométrique pendant la phase sensible (initiation paniculaire à début maturation), la longueur de la saison des pluies et le cumul pluviométrique en début de croissance de la plante. Le modèle qui en a résulté explique environ 41 % de la variance ( $R^2=0.41$ ).

Variables	Rendement simulé (sol fertile)	Rendement simulé (sol non fertile)	Rendement observé
Cycle	-0.07	-0.07	0.18
Densité des Plants	-0.31	-0.36	-0.1
Cumul1	-0.11	-0.13	-0.14
Cumul2	-0.16	-0.01	-0.29
Cumul3	0.16	0.08	0.17
Fin de sais	0.39	0.29	<b>0.56</b>
Cumul de pluies sur le cycle	0.29	0.28	0.32
Cumul de pluies MJJAS	0.24	0.28	0.21
Date semis	-0.07	0.07	<b>-0.38</b>
Onset	0.14	0.18	-0.05
Long	-0.07	-0.1	0.06
Rdt simulé (sol fertile)	1	0.95	<b>0.46</b>
Rdt simulé (sol non fertile)	0.95	1	<b>0.41</b>
Rdt observé	0.46	0.41	1

Tableau 1. Coefficients de corrélation entre différentes variables explicatives des rendements observés et simulés du mil dans la zone du degré carré de Niamey entre 2004 et 2007.

La figure 15 illustre l'adéquation par village et par année entre rendements observés (noir), et rendements simulé par le modèle SARRA-H (vert et rouge) ainsi que les rendements calculés avec la régression multiple (en bleu). L'analyses des courbes,

où chaque groupe de 10 représente les rendements des années 2004 à 2007 (1 à 10...31 à 40), permet de souligner :

- Que pour l'année 2004 les 2 modèles (statistique et SARRAH) n'arrivent pas à capter deux situations marquées alors qu'ils sont cohérents par rapport à la moyenne sur le degré carré ;
- Que la forte variabilité des rendements pour l'année 2005 est très bien reproduite par les deux modèles ;
- Que l'année 2006 est mal représentée par les deux modèles pour la même série de villages ;
- Enfin que le modèle statistique est vraiment très fidèle à la situation de 2007.

Du fait de sa meilleure performance pour 2007 le modèle statistique obtient une meilleure corrélation à l'échelle du degré carré pour les 4 années ensemble.

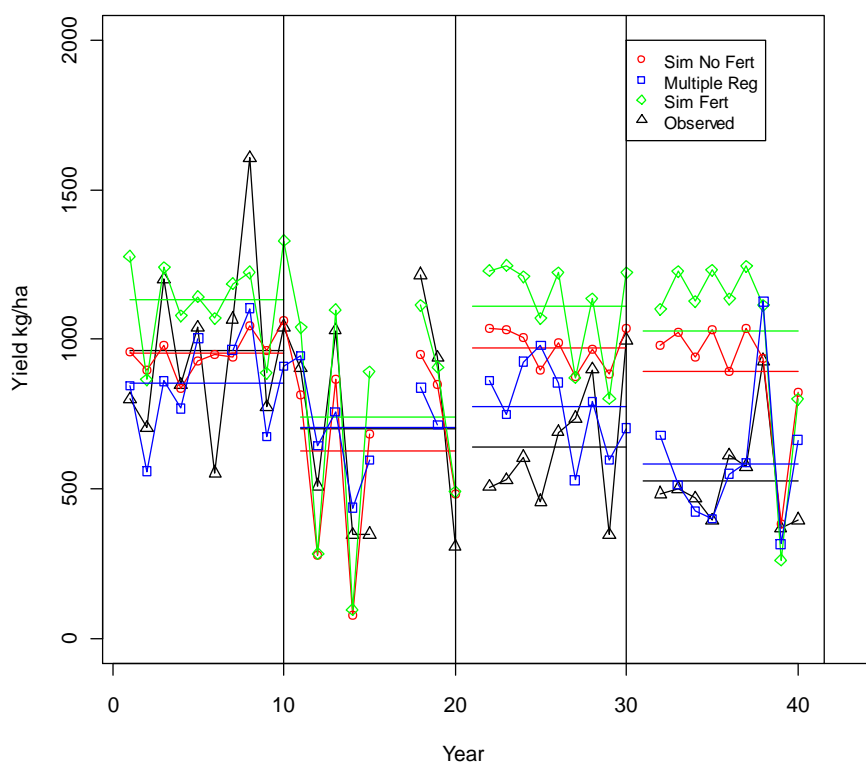


Figure 14 : Relations entre rendements moyens de mil observés et simulés par le modèle SARRA-H à l'échelle du degré carré de Niamey (années : 0-10 = 2004, 10-20 = 2005, 20-30 = 2006, 30-40 = 2007).

## IV. Conclusions

Seules les études les plus avancées, réalisées sur mil au Niger depuis 2004 et au Sénégal depuis 2005 ont été présentées ici. Les résultats des autres initiées en 2007 au Sénégal (sur maïs), Niger (sorgho), Mali (mil, sorgho, maïs) et au Burkina Faso (mil et maïs) viendront prochainement renforcer nos connaissances et jeux de données observées, permettant de travailler sur un panel de situations agro-pédo-

climatiques encore plus large. En complément de ces dispositifs de suivi en milieu paysan plusieurs essais ont été mis en place en parallèle afin de collecter des informations plus maîtrisées et précises sur les caractéristiques de développement des variétés paysannes rencontrées. Les spécificités de ces cultures sont en effet peu connues.

Les données collectées au travers de ces dispositifs sont uniques de part leur nature (rendements paysans), ampleur (plusieurs milliers de parcelles) et organisation qui permet de travailler à différents niveaux d'échelles et de faire des liens pour ces différents niveaux entre différentes disciplines (écophysiologie, agronomie, agrométéorologie, climatologie). La possibilité de changer d'échelle de la parcelle à la région permet ainsi d'être en cohérence avec des analyses régionales et les dynamiques climatiques.

Les suivis réalisés au niveau d'un ensemble de villages ont permis de documenter la grande variabilité des rendements en milieu paysan. Ils apportent également des éléments sur les réalités agricoles actuelles : conditions culturales extensives, pas d'engrais, pas de travail du sol, variétés traditionnelles. Les analyses n'ont pas permis de mettre en évidence des effets significatifs des pratiques sur les rendements. Au-delà du fait que les conditions expérimentales n'étaient pas orientées pour la mise en évidence de ces effets, cela reflète le fait que les productivités potentielles des parcelles sont intrinsèquement assez faibles du fait des modes de gestion extensifs de la fertilité et que les effets d'autres facteurs et leurs interactions peuvent brouiller les choses et masquer les différences.

Découlant des travaux de thèse d'Agali Alhassane (2009), les capacités du modèle plante à reproduire la dynamique des biomasses de deux variétés de mil du Niger en situation paysannes ont été démontrées. On peut penser que les résultats des essais de caractérisation variétale menés au Sénégal et ailleurs en 2008 permettront d'obtenir des résultats aussi satisfaisants pour d'autres variétés paysannes.

A l'échelle des villages on a obtenu des résultats mitigés avec une capacité d'explication de la variabilité inter-villageoise des rendements allant de plus de 56% à 13% en fonction des années. On a constaté en particulier de mauvaises performances du modèle lors des années marquées par des épisodes pluviométriques importants : de fait pour 2006 au Niger et 2007 au Niger et au Sénégal le modèle simule des rendements bien supérieurs aux moyennes villageoises constatées. Dans le cas de Niamey 2006 et 2007 le modèle ne simule aucun stress alors qu'il semble, d'après des observations visuelles rapportées, qu'il y a eu des stress de fin de cycle. Dans le cas de Diourbel nous n'avons pas de tels éléments.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer les mauvais rendements et les mauvaises performances du modèle pour ces deux années (ruissellements sous-estimés par le modèle ; développement racinaire réduit du fait de situation d'asphyxie et sur-estimé par le modèle ; perte de pollen ; dégâts phytosanitaires ; fertilité extrêmement réduite) mais pour le moment nous n'avons pas pu expliciter les choses. En ce qui concerne le ruissellement nous voulons en particulier introduire des fonctions de ruissellement plus complexes tenant compte de l'antériorité des pluies (Casenave et Valentin, 1989). Nous étudions aussi

l'introduction dans le modèle d'un processus de blocage/réduction de la vitesse d'enracinement en relation à des situations d'excès en eau. Nous espérons que ces évolutions donneront de meilleurs résultats, ce qui permettrait donc d'améliorer le modèle.

Enfin il est à noter qu'un modèle statistique empirique utilisant plusieurs variables dont en premier lieu le cumul des pluies de la floraison à la maturité a donné des résultats aussi bons que le modèle de culture pour 2004 et 2005, légèrement meilleurs pour 2006 et particulièrement bons pour 2007. De part sa nature (poids donné au cumul pluviométrique lors des phases de floraison à maturité) ce modèle statistique se rapproche des modèle de bilan hydrique simple. Le fait qu'il donne de bonnes estimations pour 2007 tend a priori (mas sans le démontrer cependant) à renforcer la thèse de l'existence d'un stress hydrique terminale que le modèle n'arrive pas à reproduire.

## Références bibliographiques

Alhassane A. 2008. Effets du climat et des pratiques culturales sur la croissance et le développement du mil (*pennisetum glaucum* [L.] r.br.) au sahel : contribution à l'amélioration du modèle SARRA-H de prévision des rendements. Thèse de doctorat en physiologie végétale. Université de Cocody ; Abidjan.

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

Casenave, A. et C. Valentin. 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM. Paris.

Sivakumar, M.V.K. 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern sahelian and sudanian climatic zones of west africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42:295-305