



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 gf

" Farmers yield variability assessment and validation of crop model to predict "average regional" farmers yield for the main cropped varieties of millet, sorghum and maize "

Start of the project: 2005

Duration: 60 months

In charge of the deliverable : CIRAD

Bertrand Muller¹, Alhassane Agali², Seydou Traore², Mamoutou Kouressy⁴, Leopold Some³ Michel Vaksman¹, Christian Baron¹

December 2009

¹ CIRAD, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, France

² AGRHYMET Regional Centre, Niamey, Niger

³ INERA, Ouagadougou, Burkina

⁴ IER, Bamako, Mali

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

Résumé	i
Summary	iv
I. Introduction et objectifs	1
I.1. Objectif général du « deliverable »	1
I.2. Objectifs secondaires et démarche	4
II. Matériel et méthodes	5
II.1. Zones d'étude et espèces considérées	5
II.2. Essais de caractérisation variétale en station	7
II.2.i. Objectifs et principes généraux	7
II.2.ii. Niger	8
II.2.iii. Sénégal	8
II.2.iv. Mali	10
II.2.v. Burkina Faso	12
II.3. Suivis des parcelles et productions paysannes	12
II.3.i. Objectifs et principes généraux	12
II.3.ii. Niger	14
II.3.iii. Sénégal	14
II.3.iv. Mali	15
III. Analyses des essais et paramétrage du modèle sur les variétés	16
III.1. Principales observations	16
III.1.i. Longueurs des phases et cycles	16
III.1.ii. Développements des biomasses	17
III.1.iii. Développements foliaires : SLA	19
III.2. Paramétrage du modèle sur les variétés	20
III.2.i. Gestion des phases de développement	20
III.2.ii. Paramètres gérant le bilan hydrique	24
III.2.iii. Gestion des développements des biomasses aériennes	24
IV. Variabilité des rendements paysans	29
IV.1. Précisions sur les conditions agricoles dans les zones d'étude	29
IV.1.i. Sénégal – Mil : départements de Diourbel et Kaffrine	29
IV.1.ii. Sénégal – Maïs : zone de Missirah (Tambacounda)	30
IV.1.iii. Niger – Mil : degré carré Niamey	31
IV.1.iv. Mali : zones de Koutiala et Cinzana	32
IV.2. Rangs et variabilité des rendements paysans	33
V. Simulations des productions paysannes	34
V.1. Caractéristiques générales des simulations	34
V.1.i. Dates de semis et variétés	34
V.1.ii. Caractéristiques des parcelles	35
V.2. Résultats : comparaisons simulations-observations	35
V.2.i. Rendements paysan en mil	35
V.2.ii. Rendements paysan en sorgho	39
V.2.iii. Rendements paysan en maïs	39
VI. Comparaisons avec DHC	40

VII. Conclusions	42
<i>VII.1. Ce que nous enseignent les observations</i>	42
<i>VII.2. Ce que nous enseignent les démarches adoptées pour l'adaptation du modèle</i>	43
Références bibliographiques	47
Annexes	49

Résumé

Ce livrable complète le livrable D3.1.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 ») qui rapportait des activités sur mil au Niger et au Sénégal. Ici nous présentons aussi les activités et résultats obtenus sur mil au Mali et au Burkina Faso, et ceux obtenus pour les deux autres principales céréales alimentaires d’Afrique de l’Ouest : le sorgho et le maïs. Le travail présenté a été réalisé en réseau, dans le cadre des projets AMMA et AMMA-TTC (et soutien financier AMMA-API) sous la coordination conjointe du CIRAD (WP leader) et de l’Aghrymet, sur 4 pays d’Afrique de l’Ouest, Burkina Faso (INERA), Mali (IER, ONG AMEDD), Niger (INRAN, AGRHYMET) et Sénégal (CERAAS, ISRA), en s’efforçant de suivre les mêmes méthodologies.

L’objectif général poursuivi est l’élaboration d’outils et de méthodes permettant d’améliorer la prévision agricole de la parcelle à la région. Pour cela trois actions ont été développées : 1) améliorer la connaissance des variétés locales de céréales alimentaires adoptées par les paysans pour faire face aux aléas climatiques, 2) valider/calibrer un modèle de culture sur ces principales variétés paysannes, 3) évaluer les impacts du climat et la qualité prédictive du modèle en situation paysanne (définition de scénarios de simulation représentant des pratiques paysanne de l’échelle villageoise à la région). Dans le cas présent le modèle utilisé est SarraH©Cirad qui repose sur des bases écophysiologiques simples. La question était de savoir si l’utilisation d’un modèle de ce type pourrait permettre de meilleures prévisions des productions céréalières qu’un outil plus simpliste basé sur le bilan hydrique et une relation empirique pour déterminer les rendements, tel que DHC utilisé par l’AGRHYMET pour la prévision agricole. Pour des raisons d’opérationnalité nous avons eu comme souci de simplifier et standardiser au maximum les paramétrages entre variétés et/ou espèces.

La double problématique du (i) passage aux conditions paysannes et (ii) du changement d’échelles « parcelle → village » a été traitée en agissant sur le potentiel de production en biomasse de la culture, c’est-à-dire sur l’efficacité de conversion (ϵ_b) en biomasse de l’énergie lumineuse interceptée, en considérant une efficacité maximale de 4,4 g/MJ.

Pour pouvoir atteindre au mieux nos objectifs nous avons fait l’effort d’acquérir des informations concernant les rendements en milieu paysan, en veillant à la fois à capter/contrôler leur variabilité au sein d’une région - entre villages - et leur variabilité au niveau local - entre parcelles voisines. En effet nous pouvons ainsi disposer à la fois d’informations précisément mesurées concernant les variabilités des rendements à différentes échelles, et donc distinguer a priori le poids des facteurs climatiques (échelle villageoise) des autres facteurs (échelle parcelle), et des informations sur les variétés et pratiques culturelles qui représentent des choix stratégiques des paysans au regard des contraintes environnementales

Cette étude s’est donc basée d’abord sur un effort collectif important de recueil de données de terrain en milieu paysan, et également dans le cadre d’essais

agronomiques. La grande majorité des données provenant du Niger, Mali et Sénégal ont été traitées et sont exploitables. Les données du Burkina Faso font l'objet d'un ré-examen.

Les données recueillies permettent de compter sur des informations précises et actualisées concernant les productions paysannes de mil, sorgho et maïs de différentes zones agricoles a priori représentatives. Il en ressort : (i) Que les rendements paysans sont sur l'ensemble des sites et pour toutes les espèces suivies extrêmement variables au sein d'un même village, c'est-à-dire a priori « sous la même pluviométrie » (coefficients de variation supérieurs à 40%, voire à 50%). Cette forte variabilité intra-villageoise témoigne du poids des conditions locales de production et est symptomatique de situations agricoles peu ou pas intensifiées. (ii) Qu'à l'exception des zones maliennes de Cinzana et surtout Koutiala qui est une zone cotonnière les rendements (mil, sorgho et maïs) sont particulièrement faibles, et toujours largement inférieurs aux rendements simulés avec les paramétrages issus des essais. (iii) Une diversité variétale plus importante (mil, sorgho) au Mali, surtout à Koutiala, que partout ailleurs. (iv) Des rendements en maïs au Sénégal (zone de Missirah-Tambacounda) également bien inférieurs aux valeurs simulées d'après les caractéristiques potentielles des variétés : de l'ordre de 50% du possible pour l'année 2006 ayant une pluviométrie réduite, puis de l'ordre d'à peine 20% pour les années 2007 et 2008 aux pluviométries non limitantes, voire excédentaire en 2008. on a donc partout, sauf dans la zone de Koutiala, des rendements très faibles par rapport aux potentiels permis par les conditions climatiques (simulés par le modèle).

Il a été possible de paramétrer le modèle de façon satisfaisante sur la majorité des variétés paysannes et des essais étudiés, et ce en s'efforçant de ne jouer que sur un nombre très réduit de paramètres pour distinguer les variétés entre elles : principalement les sommes de degré-jour, les coefficients de sensibilité au photopériodisme, et les relations de répartition entre les biomasses aériennes feuilles et tiges. Le modèle rend en particulier très bien compte des phases et cycles de développement des variétés paysannes qui toutes présentent un certain degré de sensibilité au photopériodisme. Certaines variétés ont cependant nécessité des paramétrages spécifiques et il sera nécessaire de revenir sur ces cas particuliers.

En ce qui concerne la prévision agricole la démarche de « passage au milieu paysan moyen » en jouant uniquement sur la réduction du coefficient de conversion de l'énergie lumineuse (ϵ_b) s'est avérée très peu performante. En effet, les valeurs moyennes de rendements étant très faibles, il faut très fortement réduire le coefficient ϵ_b (à des valeurs de l'ordre de 3 g/MJ) et de ce fait on limite les gammes de variation des rendements simulés : ainsi si on peut toujours estimer une valeur moyenne régionale inter-annuelle des rendements, on n'a plus variabilité intra-régionale (entre sites) et/ou inter-annuelle. Par contre si on garde une valeur élevée de ϵ_b de 4,4 g/MJ on estime des rendements trop importants mais on maintient une meilleure corrélation avec la réalité. Par ailleurs SarraH donne de meilleurs résultats avec cette valeur théorique de ϵ_b que l'ancien outils DHC.

L'examen détaillée des situations semble indiquer une incidence négative sur les rendements des années plutôt pluvieuses, en particulier lorsqu'il y a des périodes à très forte précipitation (mil Niamey 2006, 2007, 2008 ; mil Diourbel 2007, 2008 ; mil Kaffrine 2008 ; maïs Sénégal 2007, 2008). Cela n'a rien d'étonnant quand on sait

que les cultures étudiées poussent sur des sols peu fertiles, avec aucun ou peu d'apports fertilisants, et avec des moyens de lutte contre les adventices très réduits. De fait on peut suspecter de nombreux effets négatifs des périodes à forte pluviométrie : (i) pertes des rares éléments fertilisants par ruissellement et lixiviation ; (ii) plus grande pression des adventices, et aussi du striga si appauvrissement du sol ; (iii) taux de pollinisation affecté ; (iv) problèmes phytosanitaires pouvant affecter le développement des grains (champignon, moisissures, insectes) ; (v) possible ralentissement des mécanismes physiologiques en cas d'engorgement du sol, dont possible ralentissement du développement racinaire en profondeur qui peut avoir plus tard des conséquences néfastes sur le plan de l'alimentation hydrique de la culture ; (vi) accroissement important des ruissellements qui peut lui aussi avoir postérieurement des impacts négatifs sur la consommation de la culture ; (vii) conséquences négatives particulières sur le remplissage des grains. Malheureusement nos observations ne nous permettent pas d'étudier chacune de ces hypothèses qui sont extraites de la littérature et font actuellement l'objet d'une recherche bibliographique dans le cadre de la préparation d'une thèse (PhD) au CERAAS.

Les rendements paysans actuels en Afrique de l'Ouest soudano-sahéliennes sont donc particulièrement faibles dans leur grande majorité et loin de leurs potentiels, ce du fait de conditions non-intensifiées et même probablement appauvries par rapport à ce qu'elles ont pu être dans le passé.

Pour arriver à mieux simuler ces rendements tels qu'ils sont à l'heure actuelle il semble qu'il faudra impérativement, d'une part mieux rendre compte des principaux effets négatifs des périodes à forte pluviométrie, d'autre part considérer globalement pour chaque région une valeur type du coefficient de conversion de l'énergie lumineuse (ϵ_b) légèrement inférieure à 4,4 g/MJ : sans doute dans la gamme 3,8 - 4,4 g/MJ, car des valeurs plus faibles auraient pour effet de réduire trop fortement la gamme de réponse du modèle. Cette valeur aurait valeur d'indicateur du potentiel de production de la région. La gestion des effets négatifs des périodes à forte pluviométrie passera vraisemblablement par différentes voies, dont principalement une meilleure simulation des ruissellements et l'introduction de facteurs empiriques liés aux pluies gérant le développement végétatif et racinaire (une diminution du ϵ_b) puis le développement des grains (diminution du ϵ_b et/ou du rendement potentiel) (intégration des effets biotiques et abiotiques sur le développement des grains). Une thèse (PhD) a été envisagée dans cette optique au CERAAS.

Summary

This deliverable completes the D3.1.d deliverable « 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 » which brought back activities on millet in Niger and Senegal. Here we also relate activities and results acquired on millet in Mali and Burkina Faso, and those acquired for the two other main food cereals of Western Africa: sorghum and maize.

The present work was accomplished in network, following the same methodologies, as part of AMMA and AMMA-TTC projects (and also partly supported by AMMA-API, French AMMA component) under the joint coordination of CIRAD (WP leader) and Aghrymet, on 4 countries of Western Africa, Burkina Faso (INERA), Mali (IER, ONG AMEDD), Niger (INRAN, AGRHYMET) and Senegal (CERAAS, ISRA).

The general objective was to improve tools and methods used for yield forecast from plot to region. Three actions were developed: 1) to ameliorate the knowledge of the local varieties of cereals adopted by farmers to face climatic hazards; 2) to validate / calibrate a crop model on the main farmers varieties; 3) to assess climate impacts and predictive quality of the model for farmers situations (definition of simulation scenarios representing farmers fields situations).

The used crop simulation model is SarraH©Cirad which is based on simple ecophysiological concepts. The issue was to determine if a model of this type could allow better predictions than a simplistic tool such as DHC used by AGRHYMET, which is based on a simple water balance and an empirical relation to determine the yields. For practical and operational reasons we tried to simplify and standardize parameters values between varieties and even species.

The double issue of (i) the passage to farmers fields situations and of (ii) the scale change « plot → village » was addressed by acting on the potential of biomass production, i.e. on the conversion coefficient (ϵ_b) of intercepted radiation into biomass, considering a maximum of 4,4 g / MJ.

To be in position to reach our targets we organized information collection in order to control both local yields variability between neighbouring plots of same villages, and yields variability between different villages. Such data potentially allow us to discriminate impacts of climate (expressed at village scale) from impacts of other factors (expressed at plots level), and to get information about varieties and practices.

This study was therefore based on an important collective effort of data collection from farmers fields monitorings and also agronomical trials. Majority of data coming from Niger, Mali and Senegal were controlled and used. Data collected in Burkina Faso need to be controlled again.

The collected data allow counting on updated information about farmers productions of millet, sorghum and maize in different representative areas of West Africa. Main

information are the following ones: (i) Farmers yields local variability is very important for all cereals everywhere (variation coefficients range over 40%). Such local variabilities within neighbouring plots receiving same rainfalls are due to local practices and stress that situations are globally not intensified. (ii) Farmers yields are rather low, excepted in Malian areas and particularly in Koutiala region which is a cotton area. Sometimes yields are extremely low: it is the case in Senegal in 2007 and 2008. With the exception of Koutiala farmers yields are everywhere lower than yields simulated by the model when theoretical parameters coming from agronomical trials are considered. (iii) The varietal diversity is more important in Mali, particularly in Koutiala and for millet and sorghum, than in other areas. (iv) Maize farmers yields in Senegal (Missirah-Tambacounda) are about 50% of simulated yields for the 2006 cropping season affected by a quite low rainfall, and are only 20% of simulated yields for the 2007 and 2008 cropping seasons which benefited of important rainfalls. Thus, quite everywhere and every years farmers yields appear lower than potential yields allowed by climate (simulated by the model).

Based on the data generated by the trials it was possible to successfully parameter the model for the majority of the farmers varieties and using many similar values. The principal differences between varieties were temperatures sums, photoperiod sensitivity parameters and biomass allometrical repartition relationships (between leaves and stems). The model is able to correctly simulate the cycles of almost all the studied farmers varieties which appear in their majority to be sensitive to photoperiod. Yet, some difficulties were encountered with a few varieties, obliging to use specific values.

Regarding yield forecasting issue, the simple “conversion coefficient (ϵ_b) reduction” method gave disappointing results. Yet, since farmers average yields are very low, it is necessary to strongly reduce ϵ_b to values around 3 g/MJ, and consequently simulated yields ranges are also reduced. Thus, despite it is possible to assess a correct average inter-annual regional yield data, the model cannot simulate correctly the intra-regional variability neither the inter-annual one. On the contrary, using a high ϵ_b value (4,4 g/MJ), the model assess overestimated yields but with variations more in accordance with the reality. More, using this value SarraH provides better results than DHC.

Detailed analysis of situations seems to point out a negative impact on yields of the wet years, particularly when there are periods with very important rainfalls (millet Niamey 2006, 2007, 2008; millet Diourbel 2007, 2008; millet Kaffrine 2008; maize Senegal 2007, 2008). There's nothing surprising about that since cultures grow on poor soils, without fertilizer and with simple weeds control methods. Yet different adverse impacts of periods with strong rainfalls could be suspected: (i) losses of the rare fertilizing elements by runoff and lixiviation; (ii) bigger pressure of weeds, and also of striga due to impoverishment of the soil; (iii) affected pollination by pollen washing; (iv) phytosanitarian problems affecting grains (fungus, rottenness, insects); (v) possible slowing down of physiological mechanisms in case of saturated soil, including slowing down of roots development which might induce latter consequences on water consumption; (vi) runoff increase inducing lower infiltrated amounts which also might induce latter consequences on water consumption; (vii) particular negative consequences on grains filling.

Unfortunately our observations do not allow us to study each of these hypotheses, which are mentioned in literature. A PhD work is now starting in CERAAS to address those issues.

In conclusion farmers rainfed cereals yields appear to be particularly low in Western Africa Soudano-Sahelian areas, far from the varieties potentials allowed by climate conditions. This is due to non-intensified conditions, and situations are probably worse than what they were in previous decades.

In order to be able to better simulate farmers yields such as they actually are, it seems necessary on one hand to take in account the main negative effects of important rainfalls periods, and on another hand to consider for each region a conversion coefficient (ϵ_b) value inferior to the maximum, probably ranging between 3,8 to 4,4 g/MJ: this value would be a kind of indicator of the potential productivity of the area according to local practices. Lower values for ϵ_b are not recommended since they will reduce too much simulated yields ranges. Better runoff simulations and use of empirical coefficients linked to rainfalls to reduce biomass and grains development should be investigated. As mentioned a PhD work will address those issues.

I. Introduction et objectifs

Ce livrable fait suite et complète le livrable D3.1.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 ») qui était consacré au mil et rapportait des activités et résultats obtenus uniquement au Niger et au Sénégal. Ici nous présentons aussi les activités et résultats obtenus sur mil au Mali et au Burkina Faso, et ceux obtenus pour les deux autres principales céréales alimentaires d’Afrique de l’Ouest : le sorgho et le maïs. Pour mieux analyser la part du climat sur les stratégies paysannes et le rendement nous avons systématiquement étudié le mil dans les 4 pays. Ce livrable faisant suite au livrable « D3.1.d » certains éléments ne seront pas repris et/ou seront moins détaillés.

Le travail présenté a été réalisé en réseau, sous la coordination conjointe du CIRAD (WP leader) et de l’Aghrymet, sur 4 pays d’Afrique de l’Ouest, Burkina Faso, Mali, Niger et Sénégal, en s’efforçant de suivre les mêmes méthodologies.

Institutions partenaires :

- Burkina Faso : INERA
- Mali : IER, ONG AMEDD (Association malienne d’éveil au développement durable)
- Niger: AGRHYMET, INRAN (par le biais de UAM)
- Sénégal: ISRA, CERAAS
- Coordination officielle et participation: CIRAD (France)

1.1. Objectif général du « deliverable »

L’objectif général poursuivi est l’élaboration d’outils et de méthodes permettant d’améliorer la prévision agricole de la parcelle à la région. Pour cela trois actions ont été développées : 1) améliorer la connaissance des variétés locales de céréales alimentaires adoptées par les paysans pour faire face aux aléas climatiques, 2) valider/calibrer un modèle de culture sur ces principales variétés paysannes, 3) évaluer les impacts du climat et la qualité prédictive du modèle en situation paysanne (définition de scénarios de simulation représentant des pratiques paysanne de l’échelle villageoise à la région). Dans le cas présent le modèle utilisé est SarraH©Cirad développé par le CIRAD avec l’appui de l’AGRHYMET et du CERAAS (Dingkuhn et al., 2003; Baron et al., 2005).

La grande variabilité et les contraintes agro-climatiques des zones soudano-sahéliennes d’Afrique de l’Ouest ne sont plus à présenter (cf. livrable D3.1.dni). Dans ce contexte un ensemble de travaux et des systèmes d’alertes précoces ont été mis en place et diffusés dans les pays de la sous-région et au niveau de la communauté internationale afin de pouvoir estimer le plus précocement possible les productions céréalières pour anticiper et éviter les crises alimentaires récurrentes (Traoré et al., soumis special issue ASL 2010). Ainsi l’AGRHYMET et ses relais nationaux dans la sous-région (Directions de la Météorologie le plus souvent) utilisent un outil robuste, DHC (« diagnostic hydrique des cultures »), depuis le début des années 90, pour réaliser leurs prévisions à l’échelle régionale (Samba, 1998 ; Samba et al., 2001).

DHC couple un modèle très simple de bilan hydrique à une relation empirique qui permet d'estimer des rendements moyens de mil en relation aux indicateurs hydriques déterminés par le bilan hydrique. Le bilan hydrique fonctionne au pas de temps décadaire, et la consommation réelle en eau (ET) est fonction de l'eau dans le sol disponible pour la plante et des besoins en eau ($ETa = kc \times ETo$; kc : coefficient cultural réf. FAO ; ETo évapotranspiration potentielle). Il génère des indicateurs décadaires du niveau de satisfaction des besoins en eau des cultures (ET/ETa), qui permettent de déterminer un indicateur composite (IRESP) de la satisfaction des besoins de la culture au long de son cycle et durant les phases sensibles. La relation empirique estime le rendement moyen sur la base de la valeur de l'IRESP. Cette relation unique et linéaire a été établie pour les productions paysannes de mil de la zone Soudano-Sahélienne d'Afrique de l'Ouest suite à des campagnes d'observations en milieu paysan (projet ESPACE) dans les années 80s et 90s.

DHC a démontré ses qualités opérationnelles mais il présente cependant des limites importantes :

- la relation empirique n'a été établie que pour le mil ;
- les besoins en eau au cours du cycle de la plante sont pré-déterminés et figés (valeurs des kc) : or les variétés paysannes de mil et sorgho sont des plantes rustiques et plastiques et leurs dynamiques de développement peuvent varier en lien avec les conditions hydriques ;
- de même les kc décadaires ne peuvent rendre compte simplement et précisément des variations des longueurs des cycles des céréales africaines en relation à leur date de semis, variations qui découlent de leur caractère photopériodique ;
- enfin la relation empirique limite les rendements à 900kg/ha, ce qui s'avère insuffisant dans les zones soudaniennes, et est également parfois insuffisant pour les zones sahéliennes.

Les stratégies d'adaptation des paysans en AO face aux contraintes environnementales font appel, presque toujours, à des solutions dont les coûts sont minimalisés. Parmi ces stratégies celle qui est le plus en lien avec la variété des situations observées est le choix variétal. Depuis toujours les paysans procèdent à des sélections massales et gèrent leur semence, ce qui se traduit par des spécificités particulières, dont en premier lieu leur sensibilité au photopériodisme qui est plus ou moins marquée, en particulier en ce qui concerne le mil et le sorgho. Cette propriété fait que la durée de leur cycle varie avec la date de semis et n'est donc pas constante comme chez la plupart des variétés modernes : plus le semis est tardif, plus le cycle se raccourcit jusqu'à une longueur minimale. Cela permet qu'elles puissent être semées sur une grande période (selon les endroits de début mai et/ou début juin à fin juillet début août) en relation au démarrage de la saison des pluies, en ayant pourtant des dates de floraison pratiquement constantes et de ce fait relativement bien synchronisées en moyenne avec la fin de la saison des pluies (qui est peu variable, bien moins que le démarrage). C'est un caractère adaptatif très important qui permet à la fois d'éviter d'avoir un développement et une maturation des grains sous des conditions d'humidité trop défavorables (moisissures/champignons, insectes), d'éviter également les risques de stress hydrique en phase de floraison et/ou remplissage du grain (ce qui arriverait avec une floraison après l'arrêt des pluies), et d'éviter que certains champs arrivent à maturité

trop précocement et/ou tardivement et soient de ce fait, étant « seuls » dans le paysage, l'objet d'attaques très importantes des oiseaux.

Aussi, compte tenu des progrès réalisés en matière de modélisation des cultures, **la question à laquelle on s'est intéressé est donc de savoir si l'utilisation d'un modèle plus en mesure de pouvoir rendre compte des spécificités de développement des variétés paysannes africaines de mil, sorgho et maïs, pourrait permettre de meilleures prévisions des productions céréalières.**

Pour des raisons d'opérationnalité nous avons abordé cette question en gardant à l'esprit la nécessité de ne pas trop compliquer les choses en ce qui concerne le modèle utilisé et les informations et paramètres nécessaires. D'où, d'une part le choix du modèle SarraH qui tout en faisant appel à des concepts écophysologiques reste relativement simple, et d'autre part notre souci dans l'étude d'essayer de simplifier et standardiser au maximum les paramétrages.

Nous avons donc adopté une démarche ascendante en nous efforçant tout d'abord d'adapter/valider le modèle SarraH©Cirad sur les principales variétés rencontrées dans nos zones d'étude, avant de voir comment l'utiliser à l'échelle plus intégrée du village et/ou terroir villageois, qui est l'échelle opérationnelle de la prévision agricole car il est a priori possible d'attribuer à un terroir villageois une pluviométrie unique et représentative, soit mesurée au sein du terroir, soit estimée.

Compte tenu de la relative simplicité du modèle qui en particulier ne comporte pas de bilan azoté ou minéral et ne peut donc gérer directement ces aspects, et ni non plus les problèmes biotiques (adventices, maladies, etc.), nous avons traité le plus simplement possible la double problématique du (i) passage aux conditions paysannes et (ii) du changement d'échelles « parcelle → village » en essayant d'agir uniquement sur le potentiel de production en biomasse de la culture, c'est-à-dire concrètement sur l'efficacité de conversion en biomasse de l'énergie lumineuse interceptée. En effet on peut considérer que cette efficacité – et le potentiel de production lié – rend compte globalement de tout ou partie des effets combinés des conditions du milieu, dont en particulier le niveau de fertilité de la parcelle, le niveau des compétitions éventuelles des adventices, le niveau de certaines attaques biotiques, conditions qui découlent de la gestion du paysan et de la qualité du sol. Dans le modèle cette efficacité de production est gérée d'abord par un paramètre (ϵ_b) qui est le taux de conversion potentielle de l'énergie lumineuse interceptée par le couvert en quantité de biomasse (carbone) (qui est ensuite répartie entre les différents organes de la plante : feuille, tige, racine...), et au cours des simulations cette efficacité (ϵ_b) peut être éventuellement diminuée s'il y a une contrainte hydrique (en pratique ϵ_b est multiplié par un coefficient inférieur ou égal à 1). Notre démarche a donc consisté à calibrer le modèle à partir des essais en milieu contrôlés considérés comme représentatif des potentiels des variétés en situation optimum puis de faire varier ce paramètre d'efficacité de conversion (ϵ_b) pour retrouver des résultats similaires aux rendements paysans moyens observés.

Pour pouvoir atteindre au mieux nos objectifs nous avons fait l'effort d'acquérir des informations concernant les rendements en milieu paysan, en veillant à la fois à capter/contrôler leur variabilité au sein d'une région - entre villages - et leur variabilité au niveau local - entre parcelles voisines. En effet nous pouvons ainsi disposer à la

fois d'informations précisément mesurées concernant les variabilités des rendements à différentes échelles, et donc distinguer a priori le poids des facteurs climatiques (échelle villageoise) des autres facteurs (échelle parcelle), et des informations sur les variétés et pratiques culturales qui représentent des choix stratégiques des paysans au regard des contraintes environnementales. Une étude basée sur des données de statistiques agricoles, moyennées par nature et établies à partir de mesures disséminées et non organisées/structurées par rapports à l'échelle village/terroir, n'aurait pas permis de bénéficier de ces informations.

Ces éléments expliquent les objectifs secondaires et les étapes de l'étude.

1.2. Objectifs secondaires et démarche

1- Déterminer les principales caractéristiques des principales variétés de céréales cultivées par les paysans (des zones d'étude choisies) afin de pouvoir simuler leur développement à l'aide de modèles de culture

=> réalisation d'essais agronomiques et analyse

2- Caler-valider le modèle de culture SarraH sur ces variétés

=> résultats des essais et simulations

3- Déterminer les principales caractéristiques agronomiques des zones d'étude afin de les prendre en compte au mieux dans les démarches de prévision agricole

=> observations terrain et recueil d'infos

4- Déterminer, les rangs et variabilités des rendements agricoles dans les zones d'étude

=> suivis terrain et mesures des rendements

5- Les expliquer autant que possible par les facteurs climatiques, sol, pratiques, ennemis et autres aléas.

=> analyses des résultats

6- Réaliser des prévisions agricoles à l'aide du modèle de culture SarraH

=> simulations à l'aide du modèle

7- Comparaison avec précédents outils DHC

=> simulations comparées DHC et SarraH

Le travail a été réalisé dans le cadre des projets AMMA et AMMA-TTC et a également bénéficié du soutien financier de AMMA-API (France). Sur le plan scientifique il a également bénéficié d'acquis obtenus parallèlement et/ou précédemment dans d'autres cadres par les équipes impliquées.

II. Matériel et méthodes

II.1. Zones d'étude et espèces considérées

Il est bien évident qu'il n'était pas possible de couvrir toutes les principales zones agricoles des 4 pays compte tenu de l'ampleur d'une telle tâche et des coûts impliqués (au regard des budgets disponibles). Les choix des zones d'études (cf. tableau 1 et figure 1) ont donc été faits en tenant compte à la fois des réalités climatiques (gradients Nord-Sud au sein des pays, et globalement sur les 4 pays), et agricoles, notamment de la complémentarité entre pays en ce qui concerne les espèces étudiées, et des connaissances et expériences pratiques des équipes.

La culture qui a été le plus étudiée est le mil, ce du fait de sa position dominante dans la région. Le sorgho a été considéré essentiellement au Mali, et également au Niger. Le maïs a été considéré au Sénégal, au Burkina Faso et au Mali.

Tableau 1 : zones d'études des productions paysannes et lieux des essais agronomiques

Pays	Région	Pluviom. (mm/an)	Cultures étudiées	Systèmes Agricoles	Sols et reliefs	Station météo	Lieux des essais
Sénégal	Diourbel	400-500	Mil	M, A, N	Sableux, Plats	Diourbel /Bambey	Bambey
	Kaffrine	600-700	Mil	M, A, N, (Ma)	SA Plats	Kaffrine /Nioro	
	Missira, Tambacounda	800-900	Maïs	Ma, S, A, N, C, M	SA Plats	Tambac.	
Niger	Niamey (degré carré)	300-500	Mil	M	S à SA Plats	Niamey	Niamey
	Bengou	700	Maïs	+Ma,A/N,C	Peu valonné	Bengou	
Mali	Cinzana	500-600	Mil Sorgho	M, S, N, A, V, Se	S à SA Plats	Ségou	Station SCZ Cinzana
	Koutiala	800-900	Mil, Maïs Sorgho	M, S, Ma, C, N, A, V	SAL à AS Peu vallonné	Koutiala Et Sotuba	Station IER Sotuba
Burkina Faso	Ouahigouya, Tougou	600	Mil	+A/N	S Plats		Station INERA Saria
	Dano	900-1000	Maïs	+S,A/N,C		Glowa-Volta	

Cultures : M : Mil ; Ma : Maïs ; S : Sorgho ; A : Arachide ; N : Niébe ; C : Coton ; V : Voandzou (pois bambara) ; Se : Sésame

Sols : S : sableux ; SA : sablo-argileux ; AS : argilo-sableux ; SAL : sablo-argilo-limoneux

Reliefs :

Les principales pratiques et caractéristiques de gestion des parcelles céréalières seront décrites plus avant, de même que des précisions seront données sur les sols.

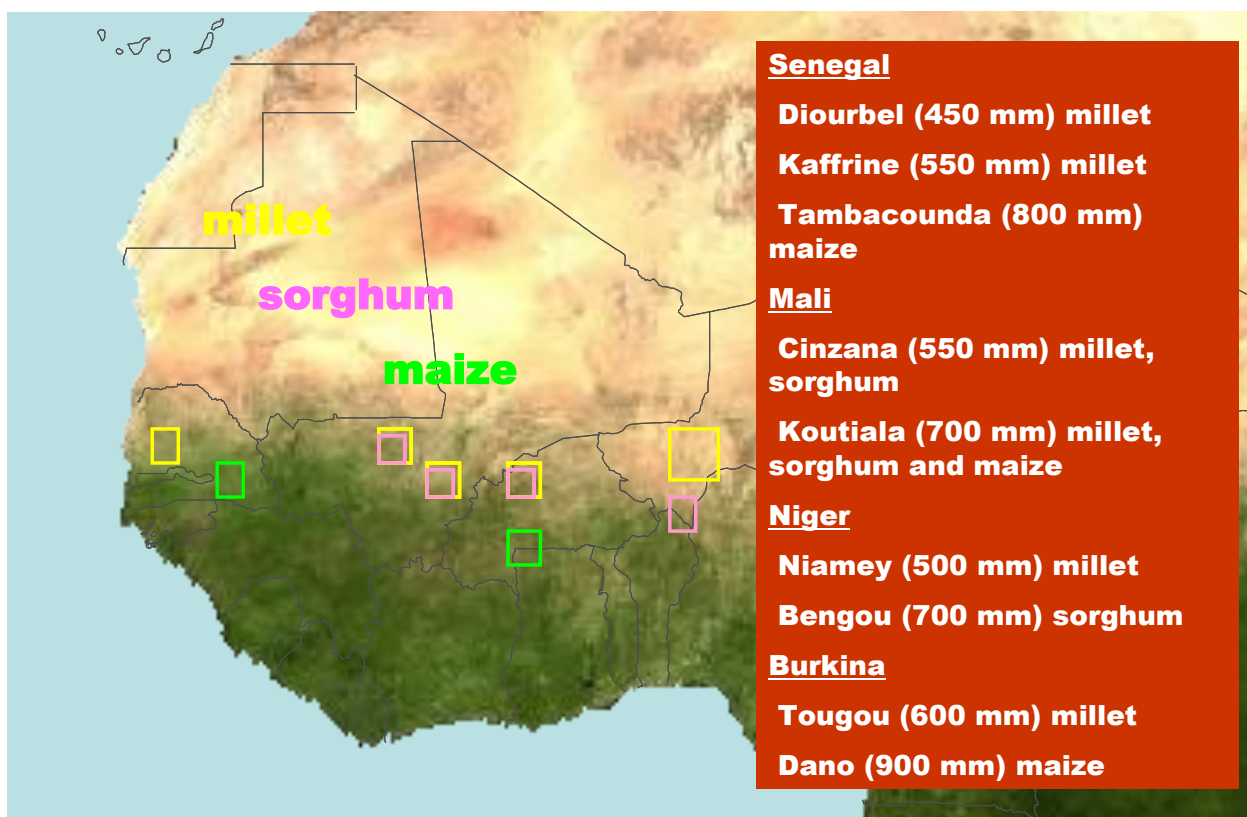


Figure 1 : zones d'étude des rendements et variétés paysannes WP3.1

II.2. Essais de caractérisation variétale en station

II.2.i. Objectifs et principes généraux

L'objectif des essais en station est de pouvoir déterminer au mieux les caractéristiques de développement des principales variétés de céréales cultivées par les paysans (des zones d'étude choisies) afin de pouvoir ensuite simuler leur développement à l'aide de modèles de culture. En l'occurrence les observations effectuées sont dictées par les besoins en information du modèle qui est utilisé, le modèle SarraH, mais elles seraient quasiment les mêmes pour la plupart des modèles de culture). Les essais en milieu contrôlés (en station agronomiques) permettent d'observer dans de meilleures conditions et avec plus de facilité et précision les caractéristiques des variétés. Par ailleurs les conditions de culture permettent a priori aux variétés de mieux exprimer leur potentiel car en principe aucun artéfact et/ou aléa important ne vient perturber leur développement et/ou les observations.

Les principales caractéristiques que l'on cherche à déterminer par ces essais sont:

- les sommes de degrés-jours qui pilotent les développements phénologiques des variétés, c'est-à-dire qui sont nécessaires et caractéristiques des différentes phases des cycles : ils gèrent les effets des températures ;
- l'éventuel caractère photopériodique de certaines variétés, et ses caractéristiques (sensibilité, déclenchement) : caractère d'adaptation à la variabilité des longueurs des saisons des pluies) ;
- les relations allométriques liant les biomasses végétatives aériennes entre elles (biomasse des tiges et biomasse des feuilles), et les niveaux de ces biomasses : spécificités variétales forte ;
- les relations entre les biomasses foliaires et les surfaces foliaires : courbe théorique d'évolution du SLA (specific leaf area) global, valeurs des surfaces foliaires (LAI, Leaf area index) : joue sur l'interception du rayonnement ;
- les niveaux potentiels des rendements en grains.

Les autres paramètres nécessaires aux simulations sont tirés de la littérature et/ou d'autres études.

Les choix des variétés étudiées en station ont été dictés par les réalités observées lors des suivis des parcelles paysannes : en fonction des noms vernaculaires en particulier. Des lots de semences ont donc été recueillis chez les paysans lors des suivis après les récoltes. On utilisera par défaut le mot « variété » pour désigner « les plantes » issues d'un lot de semences, et elles seront en général identifiées par leur type, leur nom vernaculaire et leur origine géographique.

Afin de permettre de déterminer les informations nécessaires au pilotage des phases et cycles (sommes de températures et photopériodisme), il faut en principe réaliser des observations (stades phénologiques) au cours de plusieurs cycles (3 au moins) pour chaque variété, semés à des dates de semis différentes, avec parmi eux un cycle à une date de semis extrêmement tardive (après la mi-août) de façon à annihiler pour ce cycle toute expression du photopériodisme (la durée levée – initiation paniculaire est alors minimale et ne dépend que des températures). Notons

qu'on ne rencontrera jamais dans la réalité de date de semis aussi tardive. Les 3 cycles (minimum) d'observations peuvent se dérouler sur une ou plusieurs années.

Autre point important à respecter : éviter des stress hydrique qui, au-delà des impacts sur les biomasses et rendements, sont surtout susceptibles d'altérer les durées des phases phénologiques, en les rallongeant en particulier. Pour cela il faut pouvoir compter sur un système d'irrigation d'appoint. Cela est particulièrement important pour les dates de semis tardives pour lesquelles les cycles se déroulent dans leur majorité après la fin de la saison des pluies.

II.2.ii. Niger

Une description détaillée des essais, conduits en 2002 et 2003, a déjà été faite dans le deliverable D31d et par ailleurs (Alhassane, 2009 ; Alhassane et al., 2008).

Pour rappel ces essais ont porté sur 3 variétés de mil utilisées dans la zone de Niamey : variétés HKP, ZATIB et MTDO, les variétés HKP et MTDO étant 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). Pour résumer :

- essai « fertilité » en 2002 et 2003 : 2 doses NPK x 3 variétés ;
- essai « date de semis » en 2002 et 2003 : 2 dates x 3 variétés.

II.2.iii. Sénégal

Les essais ont été menés lors de l'hivernage 2008 avec de l'irrigation de complément pour éviter les stress hydriques. Ils ont porté sur 18 variétés de mil, provenant essentiellement des départements de Diourbel et de Kaffrine, et 6 variétés de maïs provenant de la zone de Missira dans le département de Tambacounda (cf. tableau 2). On a procédé en même temps aux suivis phénologiques et des biomasses.

En ce qui concerne le mil on peut distinguer 2 grands types variétaux au Sénégal :

- Les mils de type Souna, qui sont des mils à cycle court (90-100 jours) peu ou pas photopériodiques, qui sont largement majoritaires au niveau du pays et en particulier dans la moitié nord. La recherche a développé au début des années 80 une variété épurée et légèrement améliorée de mil Souna, le Souna 3, dont les semences ont été largement diffusées. Il est important de noter que depuis cette diffusion la plupart des mils paysans de type Souna sont des croisements/mélanges issus du Souna 3 et des Sounas locaux.

Dans le groupe « Souna » on peut distinguer les mils « Thialack » qui sont cultivés dans la région du Sine-Saloum et que l'on a rencontrés en milieu paysan dans certains villages de Kaffrine. Ils sont morphologiquement très proches des autres Sounas rencontrés. Notons que leurs grains ont une composition caractéristique qui les rend plus aptes à la panification que les autres Sounas.

- Les mils de type Sanio, qui sont des mils paysans aux cycles plus longs (100 à 160 jours), photopériodiques, et qui ne se rencontrent pratiquement plus dans la moitié nord du pays sauf exceptionnellement dans certains villages proches et ou dans le Sine-Saloum. On en rencontre par contre dans la moitié sud.

Nos variétés de mil étudiées essentiellement appartiennent à ces groupes. A cela s'ajoute l'IBV qui est une variété moderne à cycle très court et à taille réduite, et le Zatib du Niger.

En ce qui concerne le maïs les suivis en milieu paysan ont permis de distinguer 3 types variétaux dans la zone d'étude, ce en relation à leur couleur de grains et/ou leur dénomination par les paysans :

- maïs « jaune court » : à grains jaunes et de cycle plutôt courts, c'est-à-dire d'après les paysans inférieurs à 100 jours ;

- maïs « jaune long » : à grains jaunes et de cycle plutôt long d'après les paysans ;

- maïs « blanc » : à grains blancs et de cycle intermédiaire d'après les paysans.

D'après les paysans le « jaune long » est véritablement traditionnel, cultivé depuis longtemps (« toujours »), a une qualité de goût plus apprécié et un cycle plus long que « le jaune court ». Les autres variétés sont d'après eux des dérivés de variétés modernes achetées et/ou introduites lors de la dernière décennie (il y a eu plusieurs « plans maïs » au Sénégal), dont le « Jaune Denté de Bambey (JDD) » qui serait à l'origine des « jaunes courts » et le « Synthétic C » qui serait à l'origine des « maïs blancs ». En termes de cycle, d'après les paysans, les « blancs » sont intermédiaires entre les « jaunes longs » et les « jaunes courts ». Cependant nous verrons que dans le cadre de nos études nous n'avons pas réellement pu mettre en évidence de différence claire de cycles entre ces variétés. Les observations obtenues lors des enquêtes des années 2006 et 2007 n'avaient pas permis d'obtenir d'information cohérente sur les cycles des variétés. Au contraire elles avaient montré qu'il y avait apparemment une certaine hétérogénéité dans la réalité, ce qui n'est pas étonnant si l'on considère que pratiquement tous les paysans recyclent leurs propres semences. Pour notre essai nous avons considéré 2 lots de semences pour chaque type de maïs, pris dans deux des villages les plus éloignés l'un de l'autre : à Fougoulou au Sud de notre zone d'étude, et à Hamdalaye Pont au Nord de la zone. Nous ne pouvions faire plus compte tenu des moyens disponibles.

Toutes les variétés ont été semées à 3 dates :

- mil : 19 juin, 22 juillet et 19 août 2008.

- maïs : 17 juin, 21 juillet et 18 août 2008.

Les essais ont été conduits dans de bonnes conditions agronomiques en respectant les recommandations de l'ISRA, avec notamment application d'engrais.

Chaque sous-essai (= 1 date de semis) était organisé en blocs avec 3 répétitions. Certaines parcelles permettaient de procéder à des prélèvements destructeurs à 4 dates (+ à récolte), d'autres à 2 dates (+ récolte) ou uniquement à 1 date (+ récolte).

Les phénologies des variétés ont toutes été suivies avec beaucoup de soin au travers d'observations phénologiques régulières (1 à 2 fois par semaine, sur 5 plantes par parcelles, soit sur 15 plantes au total par variétés).

Pour les biomasses les choses ont été simplifiées pour des raisons de coûts et également en tenant compte de la proximité évidente de certaines variétés entre elles et/ou de ce que l'on connaissait déjà à leur sujet : ainsi seules 3 variétés de mil et 3 variétés de maïs ont-elles fait l'objet d'un suivi détaillé du développement de leur biomasse au cours des cycles, avec 4 dates d'observation par cycle. Pour les autres variétés 1 seule mesure de biomasse a été faite, après l'apparition de la dernière feuille ligulée (feuille drapeau) quand en principe la biomasse « feuilles+tiges » est

maximale. Sur certaines variétés 2 mesures de biomasses ont été faites. A chaque date d'observation on a prélevé 4 poquets par parcelle, soit 12 poquets par variété. Les mesures ont permis de suivre : biomasses tiges, biomasses feuilles vertes, feuilles mortes (>50% sénescences), panicule et grains, surfaces foliaires totale, et donc par suite LAI et SLA.

Les rendements ont été établis sur 15 poquets par parcelle.

En ce qui concerne le maïs nous nous référerons également à des données provenant d'un essai mené en 2006 (sous financement autre que AMMA) qui avait permis d'obtenir des données sur 2 variétés améliorées (Teez-Yellow, cycle 75-80 jours et Sowan-Yellow, cycle 90-100 jours) : il y avait 3 dates de semis : 26 juillet, 16 août et 8 septembre 2006.

Les mesures météorologiques utilisées pour l'analyse des essais ont été recueillies sur le site même : station météorologique officielle ANAM-ISRA.

Tableau 2 : variétés de mil et maïs étudiées en station à Bambey (Sénégal) en 2008

espèce	code essai	type	précisions sur origine	suivis des biomasses		
				détaillés	intermédi.	simples
mil	V1	souna	essai ASiéné 2007			x
mil	V2	sanio	essai ASiéné 2007			x
mil	V3	thialack	Kafrine - Mabo (juin 08)	x		
mil	V4	thialack	Kafrine - Sagna (juin 08)			x
mil	V5	thialack	Kafrine - Delbi (épis 07)			x
mil	V6	zatib	paysans Niger (Agrhymet)		x	
mil	V7	sanio	Kafrine - Delbi (épis 07)		x	
mil	V8	sanio	Kafrine - Boulel (épis 07)			x
mil	V9	souna	Kafrine - Boulel (juin 08)			x
mil	V10	souna	Kafrine - Sagna (juin 08)	x		
mil	V11	souna	Kafrine - Mabo (épis 07)			x
mil	V12	souna	Diourbel - Thiock Niang	x		
mil	V13	souna	Diourbel - Mbaena Wollof			x
mil	V14	souna	Diourbel - Taïba Sérère (Bathie Sarr)			x
mil	V15	souna	Diourbel - Backfassagal (Saliou Sène)			x
mil	V16	souna	Diourbel - Backfassagal (Aliou Ngom)			x
mil	V17	Souna 3	ISRA		x	
mil	V18	IBV	ISRA			x
maïs	V1	blanc	Tambacounda - Fougoulou	x		
maïs	V2	blanc	Tambacounda - Hamdalaye Pont			x
maïs	V3	jaune long	Tambacounda - Fougoulou	x		
maïs	V4	jaune long	Tambacounda - Hamdalaye Pont			x
maïs	V5	jaune court	Tambacounda - Fougoulou	x		
maïs	V6	jaune court	Tambacounda - Hamdalaye Pont			x

II.2.iv. Mali

Les essais ont porté sur des variétés de mil et sorgho uniquement. On a distingué la caractérisation des cycles et phases phénologiques des variétés de celle des développements de leurs biomasses. Un seul essai phénologique a été mené, à Sotuba, en 2007, avec des irrigations de complément pour éviter les stress, alors que différents essais de suivis des biomasses ont été menés en 2007 et 2008 à Sotuba et Cinzana, sans irrigations de complément. Cette stratégie a permis de travailler, pour les essais phénologiques, sur un nombre important de variétés, avec des surfaces beaucoup plus réduites et plus facilement irrigables et gérables.

L'essai de caractérisation phénologique (IER Sotuba, 2007) a porté sur 12 variétés de mil et 10 variétés de sorgho provenant des villages suivis des régions de Koutiala et de Cinzana (cf. tableau 3). Il a été organisé en 4 sous-essais semés aux 4 dates suivantes : 17 juin, 16 juillet, 20 août et 18 septembre 2007. La liste des variétés est donnée au tableau 3. Chaque sous-essai était organisé en 2 blocs (2 répétitions). La gestion agronomique (intrants, etc.) a respecté les recommandations de l'IER. 1^{ère} et dernière date de semis conduites sous irrigation par goutte à goutte. Suivis phénologiques réalisés avec précision (1 à 2 passages par semaine) sur 12 plants par parcelle (soit 24 plantes/variété/date).

Tableau 3 : essais et variétés de mil et sorgho étudiées en stations à Sotuba et à Cinzana (Mali) en 2007 et 2008

essai	lieu	espèce	année	variété	type variété	provenance	village
phénologie	Sotuba	sorgho	2007	Kéniké	variété paysanne	Cinzana	Berthéla
			2007	CSM3-E	issue de var. recherche	Cinzana	Bouawéré
			2007	Dré	variété paysanne	Cinzana	Mantana
			2007	Niodjé	variété paysanne	Cinzana	Farissouma
			2007	Kéniké	variété paysanne	Cinzana	Berthéla
			2007	Kénikéba	variété paysanne	Koutiala	Finkoloni
			2007	Timari	variété paysanne	Koutiala	Nankorola
			2007	Séguétana	variété paysanne	Koutiala	Kapala
			2007	Séguétana	variété paysanne	Koutiala	Sorobasso
			2007	Tiémoir	variété paysanne	Koutiala	Zandiala
phénologie	Sotuba	mil	2007	Boboni	variété paysanne	Cinzana	Sanogola
			2007	Souna	variété paysanne	Cinzana	Farissouma
			2007	Niosi	variété paysanne	Cinzana	N'Gakoro
			2007	Boboni	variété paysanne	Cinzana	Farissouma
			2007	Boboni	variété paysanne	Cinzana	Bouawéri
			2007	Boboni misen	variété paysanne	Cinzana	Berthéla
			2007	Boboni	variété paysanne	Cinzana	N'Gakoro
			2007	Warablecou	variété paysanne	Koutiala	Zandiéla
			2007	Gouétirékolo	variété paysanne	Koutiala	Sorobasso
			2007	Choho	variété paysanne	Koutiala	Kapala
			2007	Sagnon46	variété paysanne	Koutiala	Nankorola
			2007	Sagnon9	variété paysanne	Koutiala	Finkoloni
biomasse	Cinzana	sorgho	2007, 2008	CSM63	variété locale améliorée		
			2007, 2008	Kenikeba	variété paysanne	Cinzana	
			2008	V7	nouvelle création		
			2008	V248	nouvelle création		
biomasse	Sotuba	sorgho	2007	Timari	variété paysanne		Nankorola
			2007	Grinkan	variété locale améliorée		
		mil	2007, 2008	Choho	variété paysanne		Nankorola
biomasse	Cinzana	mil	2007, 2008	Toroniou	variété locale améliorée		
			2007	Boboni	variété paysanne		
			2008	SNTC05-09	nouvelle création		
			2008	SNTM12-09	nouvelle création		
			2008	SNTM20-09	nouvelle création		

Les essais de suivis des biomasses ont porté sur un nombre plus réduit de variétés qui ont été choisies pour leur diversité et leur représentativité.

Station de Sotuba : on y a étudié des variétés de la zone de Koutiala car il s'agit de la même zone agroécologique. 2 variétés de sorgho, 1 de mil.

Station de Cinzana : 4 variétés de sorgho, dont 2 variétés non d'origine paysanne mais récemment développées par la recherche. Et 5 variétés de mil, dont 3 variétés non d'origine paysanne mais récemment développées par la recherche.

Essais organisés en blocs avec 4 répétitions. 5 dates de prélèvements correspondent aux principales phases : début tallage, initiation paniculaire (environ début montaison), feuille drapeau, pleine floraison, et maturité (récolte). A chaque date de prélèvement : 3 poquets / parcelle

Observations :

Suivis des biomasses tiges, biomasses feuilles vertes, feuilles mortes (>50% sénescences), panicule et grains. Nombres de talles mortes et vivantes. SLA (à Sotuba uniquement) : mesures de la surface foliaire (par scanner) et du poids sec de la dernière feuille ligulée du brin maître. LAI par calcul ensuite.

Rendements mesurés sur 18 poquets.

Les données météorologiques proviennent de la station météorologique de Sotuba pour les essais à Sotuba, et de la station synoptique de Ségou, pour Cinzana, plus un pluviomètre installé sur place.

NB : les essais en station à Cinzana ont été réalisés sous la responsabilité de Dr Samba Traoré (IER). Les essais en station à Sotuba ont été réalisés sous la responsabilité de Dr Mamoutou Kouressy (IER).

II.2.v. Burkina Faso

Les essais ont eu lieu à la station agronomique INERA de Saria, en 2007 et 2008. Ils ont porté sur :

- deux variétés de mil de la zone de Ouahigouya : Goursi et Tougou.
- deux variétés de maïs de la région de Dano : Barka et KPB.

Bénéficiant d'irrigation de complément ces essais ont porté à la fois sur le développement phénologique et le développement des biomasses. 2 dates de semis étaient envisagées chaque année mais des contraintes ont limité les choses à une seule en 2007. Les variétés ont donc été semées à 3 dates : mil : 27 juillet 2007, 11 juillet 2008 et 31 juillet 2008 ; maïs : 21 juillet 2007, 21 juin 2008 et 11 juillet 2008.

Les essais ont été organisés en blocs avec 4 répétitions.

Les mesures de biomasses aériennes sont faites à 5 dates, dont la dernière à la maturité.

II.3. Suivis des parcelles et productions paysannes

II.3.i. Objectifs et principes généraux

L'objectif est de connaître et pouvoir caractériser les gammes et variabilités des rendements paysans (tels qu'ils sont) à toutes les échelles au sein de petites régions agricoles données, c'est-à-dire aux 2 échelles suivantes :

- au sein des villages : variabilité « locale » et/ou « intra-villageoise » et/ou « inter-parcellaire », qui va être essentiellement due aux conditions locales de la parcelle (topographie, sol) et aux pratiques culturelles, passées (précédents/rotations, gestion de la fertilité), et au cours de la campagne, à savoir de l'itinéraire technique proprement dit (dates de semis, choix variétal, préparation, interventions, usage d'engrais et/ou matière organique, etc.), ainsi que des aléas éventuels et ennemis des cultures, tout ceci a priori étant soumis, au sein d'un même village, au mêmes conditions climatiques, dont de pluviométrie. Bien entendu on ne peut écarter l'hypothèse que la pluviométrie puisse varier localement entre parcelles, mais cela est minimisé par le fait que la plupart des parcelles se trouvent en général dans un

rayon de moins de 2 kilomètres du centre du village. Un pluviomètre est installé dans chaque village.

- entre les villages d'une même région agricole : variabilité « intra-régionale » et/ou « inter-villageoise » : cette variabilité peut venir à la fois des conditions locales, dont en particulier du milieu physique et/ou des pratiques dominantes, et bien entendu de la variabilité climatique, c'est-à-dire avant tout pluviométrique. C'est essentiellement cette source de variabilité (pluie) qui est recherchée et considérée car on a travaillé dans des petites régions où les pratiques dominantes sont identiques et en général les conditions de sol peu variables.

D'où le choix, dans le cadre du projet, d'adopter une méthodologie commune de suivi avec au minimum 5 villages par région considérée, éloignés de 20 à 30 km les uns des autres, et, pour s'assurer de bien capter les réalités et variabilités locales, de travailler sur environ 30 parcelles de la même espèce (mil et/ou sorgho et/ou maïs) par village et par saison culturale. Pour la zone de Niamey les choses ont été un peu différentes avec le suivi d'une dizaine de villages dans la poursuite des années précédentes (depuis 2004).

Pour s'assurer au mieux de ce que la trentaine de parcelles considérées dans chaque village soit en mesure de réellement décrire la réalité, et éviter ainsi d'éventuels biais résultant de mauvais échantillonnage, on s'est assuré de choisir les parcelles au hasard. Pour y arriver de façon simple et en tenant compte des réalités agricoles on a choisi au hasard dans chaque village un certain nombre « d'exploitations agricoles » (appelées aussi « unités de production » (Mali) et/ou « carrés » (Sénégal)), d'après les listes officielles de recensement disponibles, et l'on a suivi toutes les parcelles semées de ces exploitations, jusqu'à concurrence d'obtenir le nombre total de parcelles souhaité par village (environ 30 par espèce par village par an). Cette méthode simple évite d'avoir à échantillonner sur l'ensemble des parcelles, ce qui peut être compliqué, et/ou de devoir établir des typologies ou autres analyses sur les exploitations et/ou parcelles. Il faut bien garder à l'esprit que l'objectif est de caractériser la diversité globale, et que l'on ne prétend pas pouvoir au final être en mesure de mener des analyses agronomiques approfondies en relation à l'ensemble des facteurs : en effet un tel objectif aurait impliqué des études préalables pour définir des échantillons adaptés et ciblés permettant d'avoir des nombres d'observations suffisants pour chaque situation à étudier, et se serait traduit au final par un plus grand nombre de parcelles à suivre. Ce n'était pas l'objectif et les moyens disponibles ne l'aurait pas permis a priori.

Les rendements ont été mesurés avec précision sur 3 ou 4 placettes (carrés) de rendement pour chaque parcelle, avec des placettes de 15 à 25 poquets chacune suivant les zones. Le poids total des grains de chaque placette a été déterminé. Parfois également le poids total de biomasse (tiges+feuilles), et certaines composantes du rendement selon les possibilités : nombre de poquets, de tiges, d'épis, et parfois PMG (poids de mille grains).

Les autres principes communs des suivis étaient les suivants :

- possibilité d'avoir des données météorologiques journalières pour la région ;
- présence d'un pluviomètre dans chaque village, et suivi journalier des pluies ;
- jeu d'informations et d'observations minimales recueillies sur chaque parcelle et culture en cours de campagne au travers de passages réguliers :

- nature du sol (nom, texture), pente et position topographique ;
- type de parcelle et/ou distance au village pour distinguer dans le parcellaire s'il s'agit d'un champ de case ou de brousse (et variantes) ;
- précédent direct (éventuellement sur plusieurs années) ;
- variété avec quelques précisions a priori : type, cycle ;
- associations éventuelles ;
- préparation : travail du sol ;
- apports de fumures organiques et/ou minérales ;
- dates de semis et resemis : pour déterminer le véritable démarrage de chaque culture suivie jusqu'à récolte, comprendre les logiques de semis, repérer les éventuels échecs ;
- date de 50% floraison mâle (éventuellement date émergence feuille drapeau) ;
- date de récolte et si possible date de maturité effective ;
- principaux événements culturaux : dont démariage, sarclages, apports fertilisants et usages éventuels de pesticides
- principaux problèmes biotiques jugés comme préjudiciables : adventices, striga, attaques d'insectes, d'oiseaux, maladies, autres aléas comme des verses, inondations, dégâts d'animaux, etc. : ces aléas n'ont pas toujours été notés avec attention suivant la qualité des observateurs locaux.

Il faut souligner cependant que la quantité, et la qualité, de ces informations est très inégale (surtout en ce qui concerne les aléas et stades culturaux) selon les possibilités locales et les intervenants (techniciens ou paysans désignés).

Des relevés au GPS ont parfois été réalisés pour pouvoir appréhender les superficies cultivées au sein des terroirs et par exploitation et leur distribution dans l'espace.

II.3.ii. Niger

La zone d'étude a été déjà décrite.

II.3.iii. Sénégal

Département de Diourbel : Mil

Mil unique céréale. Suivi en 2006, 2007 et 2008.

5 villages : Back Fasagal, Mbaena Wollof, Diakael Dig, Taiba Serère et Thiock Niang (+ Djigueul en 2006).

Données pluviométriques relevées sur place : 1 pluviomètre manuel installé par village.

Données météorologiques : données de la station agronomique de Bambey, située à environ 40 km à l'ouest.

Département de Kaffrine : Mil

Mil dominant. Suivis en 2007 et 2008.

5 villages : Boulel, Delby, Sagna, Mabo (Keur Babou), Nganda (Keur Djiby Diop)

NB : Du sorgho aussi mais peu. Du maïs en champs de case dans les villages au sud les plus arrosés.

Données pluviométriques relevées sur place : 1 pluviomètre manuel installé par village.

Données météorologiques : en 2007 données de la station agronomique de Nioro, située à environ 30 km à l'ouest ; en 2008 données d'une station agrométéorologique automatique CIMEL installée à Kaffrine.

Département de Tambacounda – zone de Missira : Maïs

Maïs dominant. Suivi en 2006, 2007 et 2008.

5 villages : Birataba, Fougoulou, Hamdalaye Pont, Medina Diam, Saroudia

NB : Du sorgho et du mil (type Sanio).

Données pluviométriques relevées sur place : 1 pluviomètre manuel installé par village.

Données météorologiques : données de la station de l'aéroport de Tambacounda, située à environ 10 km au nord.

II.3.iv. Mali

Zone de Koutiala : Mil, sorgho, maïs suivis

5 villages : Villages de Sorobasso, Nankorola, Zandiela, Finkoloni, Kapala

Un pluviomètre par village.

Station synoptique de Koutiala.

L'ONG AMEDD (Association malienne d'éveil au développement durable) a réalisé le travail de suivi en milieu paysan dans la zone de Koutiala.

Zone de Cinzana : Mil et sorgho suivis

Villages de Fambougou, Ngakoro, Berthéla (2008 uniquement), Farisouma, Bouawéré

Le mil est dominant en termes de superficie

Etalement des dates de semis : de fin juin – début juillet (exceptionnellement avant en juin), jusqu'à la première décade d'août au plus tard (NB après cela on peut encore semer de l'arachide ou du niébé). Le semis à sec se fait peu : avant oui, mais évolution due à l'équipement.

Un pluviomètre par village.

Station synoptique de Ségou.

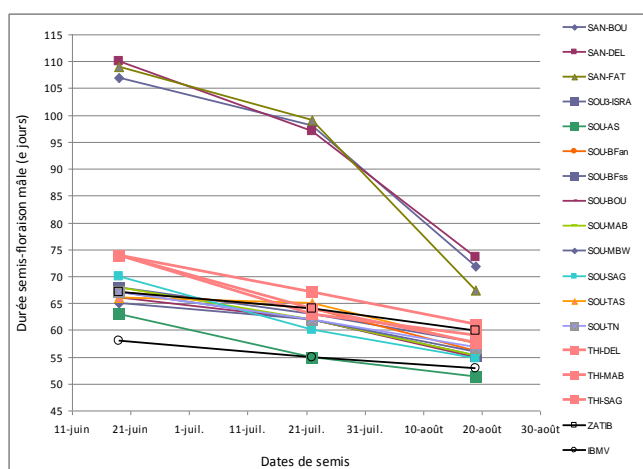
Pour la zone de Cinzana les suivis en milieu paysan ont été réalisés par l'équipe SPGREN (Système de Production et Gestion des Ressources Naturelles) de l'IER (responsable M. Diakalia Sogodogo).

III. Analyses des essais et paramétrage du modèle sur les variétés

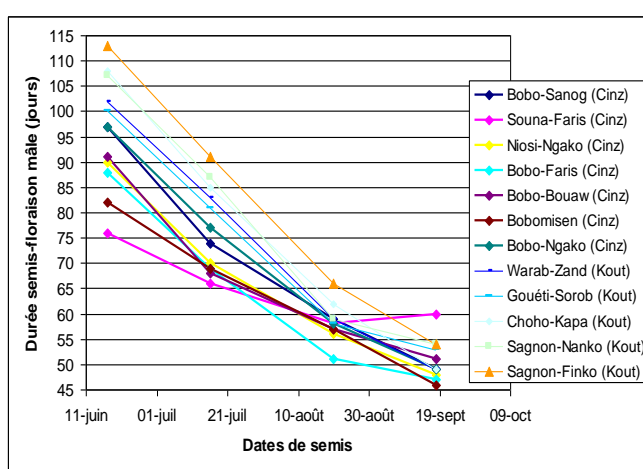
III.1. Principales observations

III.1.i. Longueurs des phases et cycles

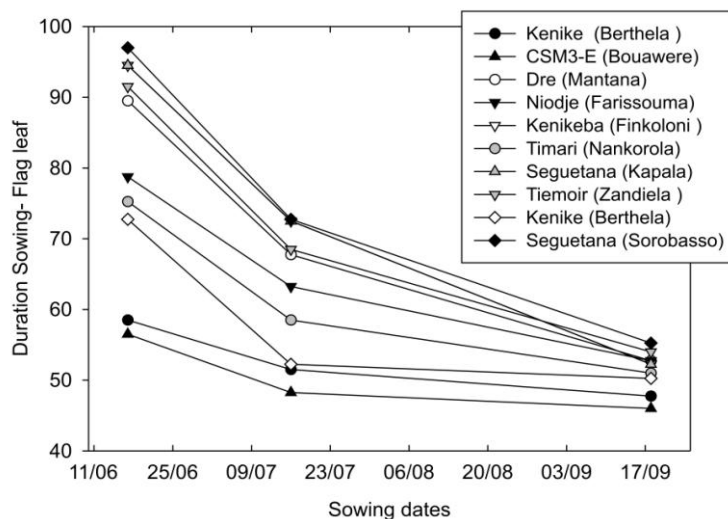
Les essais ont permis d'obtenir les informations recherchées. On présente certains résultats aux figures 2.



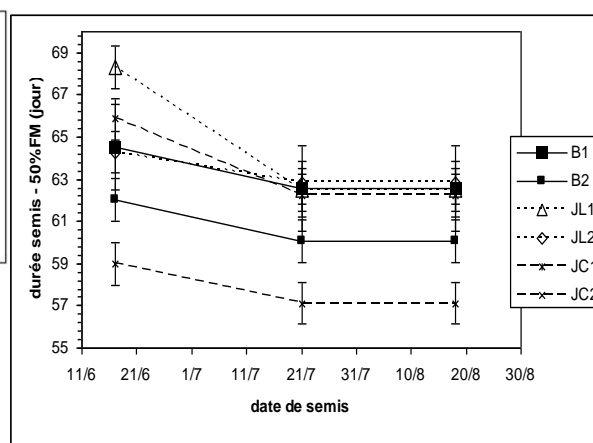
a) mil Sénégal



b) mil Mali



c) Sorgho Mali



d) Maïs Sénégal

Figure 2 : variations des durées à floraison et/ou feuilles drapeau des variétés paysannes en relation à la date de semis : cas a) des mil du Sénégal, b) des mil du Mali, c) des sorgho du Mali, d) des maïs du Sénégal.

Les données confirment le caractère photopériodique de la plupart des variétés paysannes testées, à l'exception des variétés de maïs du Sénégal qui ne le sont a priori pas, ou très peu dans le cas d'un des maïs « jaune long » (JL1).

On retrouve pour le mil au Sénégal les deux grands groupes variétaux :

- les Souna, de cycle court et peu photopériodiques : moins de 10 jours entre les semis les plus précoces et les plus tardifs ;

- les Sanio, de cycle plus long et photopériodiques : 35 à 40 jours entre les semis les plus précoces et les plus tardifs ;

Au sein des Souna les mil Thialack ont des cycles légèrement plus longs.

On note que même la variété moderne à cycle court IBMV montre également une légère diminution de son cycle (5 jours).

Il est possible que si l'on avait semé au Sénégal les mil à une date encore plus tardive, type mi-septembre comme la 4^{ème} date étudiée au Mali, on aurait constaté encore une légère diminution des cycles, surtout pour les Sanios. Cependant on ne peut l'affirmer. Quoiqu'il en soit ces observations sont a priori suffisantes pour caler les développements.

Par comparaison les mils étudiés au Mali sont tous plus photopériodiques que les mil Souna et ont des cycles très variables se situant entre les Thialack et les Sanio étudiés au Sénégal. On note que les mil provenant de la région de Cinzana ont des cycles plus courts et sont moins photopériodiques que ceux de la région de Koutiala : c'est à mettre en relation avec la position plus au nord de Cinzana et sa saison des pluies plus courte.

Cette tendance se confirme pour les sorghos : on note également que ceux de la zone de Cinzana ont des cycles plus courts et sont moins photopériodiques que ceux de la zone de Koutiala.

Ces observations montrent bien qu'un des caractères d'adaptation à l'environnement reconnu comme primordial par les agriculteurs est bien la concordance entre la fin de la saison et le début du remplissage des grains.

III.1.ii. Développements des biomasses

La réduction des biomasses qui accompagnent le raccourcissement des cycles des variétés photopériodiques en cas de semis tardif a déjà été évoquée dans le deliverable D3.1d. Nous illustrons ici cette réalité avec les valeurs maximales de biomasses (feuilles+tiges) après la sortie de la feuille drapeau sur les mil Souna du Sénégal (figure. 3) pour les 3 dates de semis de l'essai mené en 2008 à Bambey. Notons que les variations peuvent être parfois plus importantes entre la 1^{ère} date (19 juin) et la 2^{nde} (22 juillet) qu'entre la 2^{nde} et la 3^{ème} (19 août) : au-delà de la réduction du cycle qui est moins marquée entre la 1^{ère} et la 2^{nde} date de semis qu'entre la 2^{nde} et la 3^{ème} date, cela peut traduire également un ensemble de contraintes agronomiques.

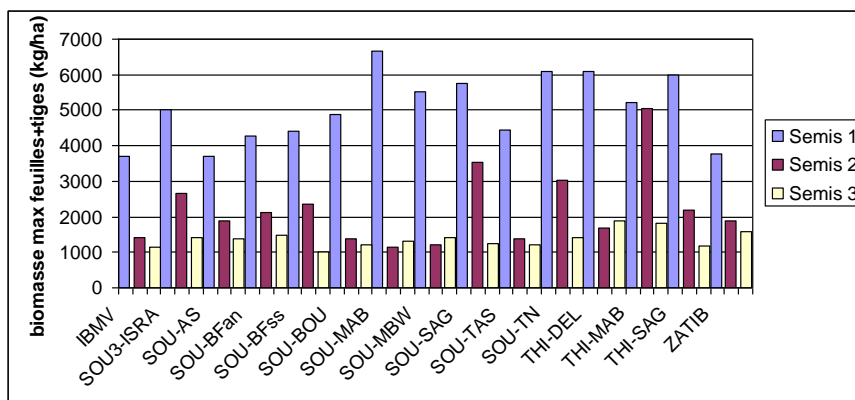


Figure 3 : variations des biomasses feuilles+tiges maximales en relation à la date de semis chez les mil à cycle court (Souna, Thialack) du Sénégal.

Les variétés, ou plutôt groupes variétaux, possèdent des caractères morphologiques propres dont on peut rendre compte par des lois de répartition de leur biomasses, dites relations allométriques. Dans le modèle SarraH la répartition de la production carbonée entre les différentes composantes de la plante est gérée jusqu'à floraison par deux relations de répartition : tout d'abord relation allométrique de répartition entre les racines et les parties aériennes, puis relation allométrique de répartition entre les tiges et les feuilles : cette dernière lie la valeur du ratio (biomasse feuilles/biomasse feuilles+tiges) à la valeur de la biomasse feuilles+tiges. Un des objectifs de l'étude était donc de déterminer pour les différentes variétés les relations allométriques liant les biomasses des tiges et des feuilles, afin de voir dans un second temps s'il serait possible d'établir des relations communes aux variétés. La figure 4 présente les observations.

On constate une forte diversité au sein des variétés de mil étudiées, avec des différences très importantes entre les extrêmes que sont d'une part les mil Sanio du Sénégal et Choho du Mali, et la variété améliorée HKP du Niger. On note que de nombreuses variétés montrent des caractéristiques très proches : Souna, Thialack, Zatib, Toroniou, MTDO, SNTC.

On trouve beaucoup moins de différences entre les variétés étudiées de sorgho, et aucune entre les 3 maïs observés. On note que ces derniers se distinguent des variétés modernes qui ont été étudiées dans le cadre d'autres essais.

Pour terminer il est important de préciser que l'examen détaillé des données, ainsi que celles d'autres essais, indique que ces relations allométriques ne changent pas, ni avec la longueur du cycle chez les variétés photopériodiques, ni avec le niveau de développement de la biomasse, ni le niveau de fertilité, ni la densité (si l'on se réfère à la biomasse par plante/poquet) et enfin ni non plus avec un stress hydrique. Il s'agit donc d'une caractéristique variétale robuste et pratique sur le plan opérationnel et de la modélisation des cultures.

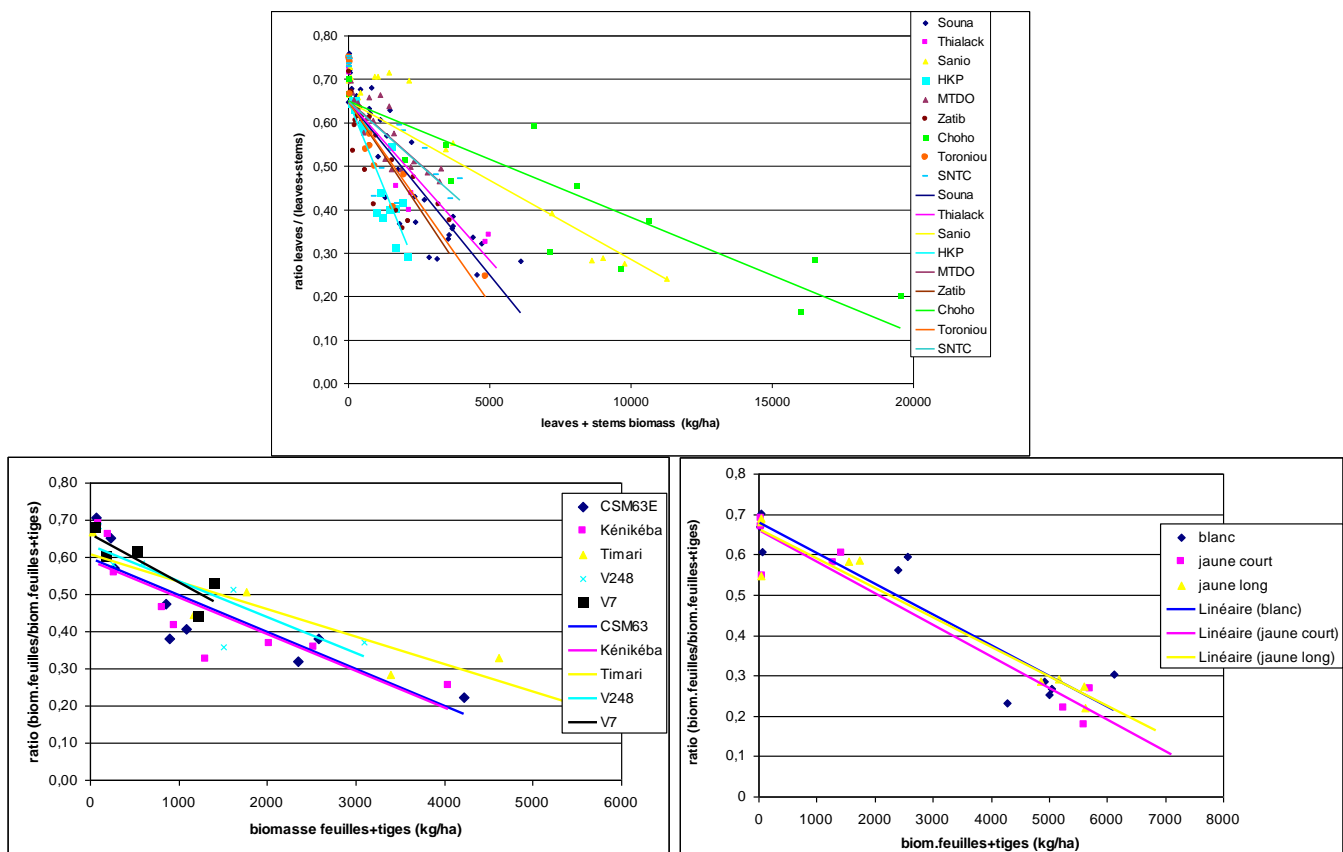


Figure 4 : relations entre les biomasses feuilles et tiges des variétés étudiées : a) mil, b) sorgho, c) maïs.

III.1.iii. Développements foliaires : SLA

Dans le modèle, une fois la biomasse feuille du jour déterminée (par la relation allométrique), la surface foliaire du couvert est calculée par le biais de la valeur du jour du « specific leaf area » (SLA) global (ensemble des feuilles) de la culture qui est le ratio (surface foliaire totale verte / biomasse foliaire totale feuilles vertes). Nous avons cherché à savoir si les valeurs des SLA des variétés différaient entre elles. Les valeurs recueillies sont présentées en figure 5. Pour le mil un très grand nombre de données provient du Sénégal : elles ont été recueillies sur plusieurs variétés (Souna, Sanio, Thialack, IBMV, Zatib) au cours de différents essais, pas seulement dans le cadre de ceux présentés ici. Par ailleurs il faut savoir qu'une valeur maximale de $1000 \text{ cm}^2/\text{g}$ est citée dans la littérature pour les jeunes feuilles de mil (Van Oosterom et al., 2002). On a également représenté une courbe de SLA établie par Affholder (1997) pour le mil Souna 3.

On constate une grande homogénéité des observations effectuées sur mil au Sénégal ces dernières années mais avec une certaine différence avec la courbe d'Affholder (1997) pour les valeurs élevées des tous premiers jours du cycle. On note que les valeurs obtenues au Mali sur mil et sorgho se démarquent fortement pour les valeurs des premiers jours car elles sont très faibles. Sur la base de ces observations et en référence à la valeur maximale citée dans la littérature pour le mil nous avons considéré que les valeurs initiales faibles relevées au Mali étaient sans doutes des erreurs, ce qui n'a rien d'étonnant car il est relativement difficile de mesurer des SLA pour les toutes jeunes feuilles (surtout par des moyens rudimentaires –

photocopieuse – comme cela a été le cas au Mali). Les observations recueillies sur maïs s’alignent a priori sur la courbe mil établie par Affholder.

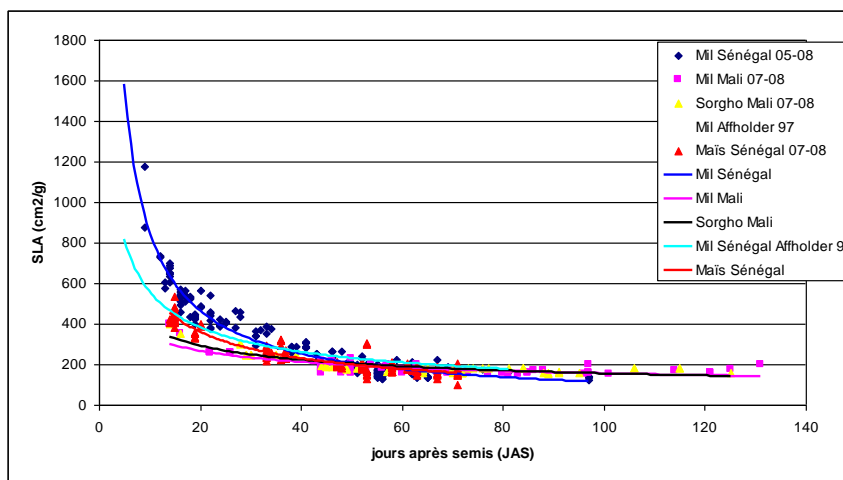


Figure 5 : valeurs observées de SLA (toutes feuilles vertes) sur mil, sorgho et maïs

Sur la base de ces données nous avons conclu à la possibilité de nous référer a priori à une seule et unique évolution des SLA pour toutes les variétés de mil et sorgho, proche de celle établie par Affholder (1997) pour le mil au Sénégal, en considérant un SLA global (ensemble des feuilles) maxima (initiale) de l'ordre de 800-900 cm²/g et un SLA global minima (à épisaison) de l'ordre de 180-200 cm²/g pour les variétés à cycle court et de 140-160 cm²/g pour celles à cycle long. Pour le maïs nous avons considéré une gamme de 500-600 à 160-200 cm²/g.

III.2. Paramétrage du modèle sur les variétés

III.2.i. Gestion des phases de développement

a) Choix des températures cardinales :

Le module de calcul des sommes de températures de SarraH (calcul des degrés-jour) fait appel à un algorithme très simple qui est le suivant :

$$\text{DegresDuJour} = \text{Max}(\text{Min}(\text{TOpt}, \text{TMoy}), \text{TBase}) - \text{TBase}$$

où

TMoy est la température moyenne du jour, égale à $(\text{Tmax} + \text{Tmin})/2$

TBase est la température de base considérée

TOpt un paramètre qui représente la température moyenne du jour au-delà de laquelle il n'y a pas de développement.

Le choix de la température de base ne pose pas de problème particulier car d'une part il y a accord dans la littérature à ce sujet pour les mil et variétés tropicales de sorgho et maïs à ± 1 degré près (entre 10 et 12°C) (Ndiaye, 1997 ; Van Oosterom et al., 2002), et d'autre part parce que le choix de la valeur n'aura aucune incidence vu que nos cycles se déroulent en saison chaude. Nous avons retenu une valeur commune de 11°C pour toutes nos variétés de mil, sorgho et maïs.

Le choix de la valeur du paramètre T_{Opt} est plus problématique car les valeurs citées dans la littérature se réfèrent à d'autres algorithmes de calcul des degrés-jour, plus élaborés, avec un ou deux paramètres en sus de T_{Base}, à savoir :

- T_{optimal}, qui dans certains modèles sert à borner T_{max}, signifiant qu'au-delà il n'y a pas de croissance, et qui dans d'autres modèles marque la limite à partir de laquelle le développement commence à être altéré (Van Oosterrom et al., 2002) : les valeurs citées vont de 30 à 35°C ;

- T_{maximum} qui est la température au-delà de laquelle il n'y a plus de développement (Van Oosterrom et al., 2002) : valeurs citées de 45 à 47°C.

Après avoir comparé sur quelques jeux de données les résultats donnés par l'algorithme de SarraH pour différentes valeurs de T_{Opt} et celles données par un algorithme faisant le bornage de T_{max} avec une valeur T_{optimale} de 35°C, nous avons retenu une valeur de 30°C pour le paramètre T_{Opt}, unique pour toutes les variétés de mil, sorgho et maïs. Le choix de cette valeur unique n'a pas posé de problème par la suite.

b) Paramétrage des cycles :

Une fois que les conditions de début de germination sont réunies (en relation à l'humidité du sol), le cycle de la culture est découpé chez SarraH en 6 phases successives dont les longueurs sont gérées en relation aux températures ou à la durée du jour pour la période éventuellement sensible à la photopériode (appelée PSP dans SarraH) qui précède l'initiation paniculaire (IP) (cf. Figure 6).

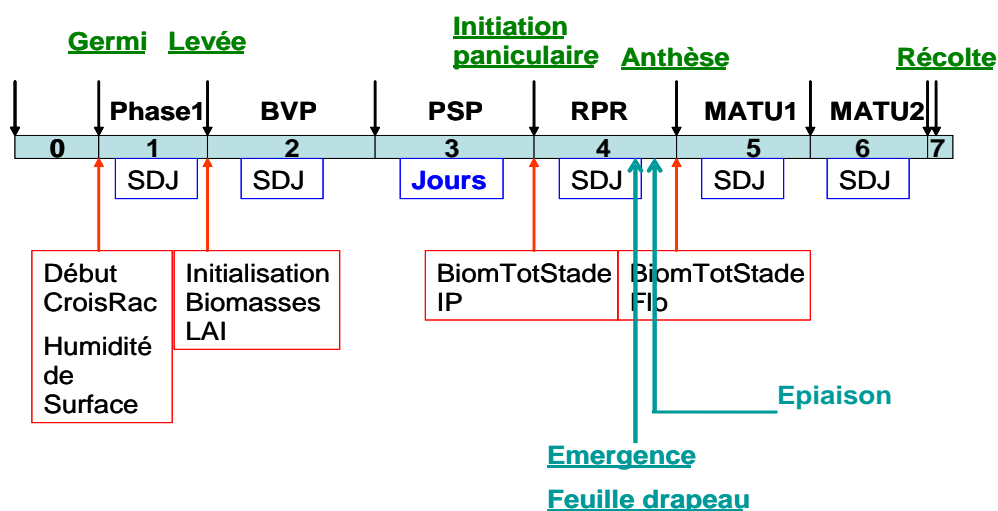


Figure 6 : découpage du cycle de développement chez SarraH (les longueurs des phases ne sont pas indicatives).

Les céréales photopériodiques d'Afrique de l'Ouest sont des plantes de jours courts sensibles au raccourcissement de la durée du jour (à partir du 21 juin). Dans SarraH la longueur de la phase PSP est gérée par un module sophistiqué (modèle « impatience », Dingkuhn et al., 2008) faisant appel à 4 paramètres. Au minimum la durée de la phase PSP est de 1 jour : c'est le cas lorsque la culture est semée très tardivement, au-delà de la mi-août et que son photopériodisme ne s'exprime plus. Son cycle est alors minimum, réduit, après levée, à la somme des phases BVP (phase juvénile d'installation, insensible à la photopériode) et RPR (entre initiation paniculaire et anthèse/floraison mâle). Précisons que dans nos essais de caractérisation des variétés il n'y a pas eu de détermination directe de la date de l'IP

car cela implique des observations destructrices et délicates. Pour le maïs on peut cependant estimer la date de l'IP car en principe celle-ci a lieu quand 50% du total des feuilles sont visibles (Hanway, 1989). Nous avons appliqué cette méthode.

Pour procéder au paramétrage des variétés de mil et sorgho pour SarraH nous avons choisi, sur la base de nos expériences et dans le souci d'aboutir à une simplification des paramétrages, de considérer des valeurs communes de sommes de degrés-jour pour la « phase1 » (entre début de germination et levée), RPR, Matu1 (développement-remplissage du grain) et Matu2 (assèchement du grain jusqu'à sa maturité), de durées moyennes de 3, 30, 20 et 10 jours respectivement. Pour la phase germination-levée cela se justifie sans difficulté sur la base des observations de terrain qui montrent toujours des levées entre 3 et 4 jours après semis si le sol est humide. Pour les phases Matu1 et Matu2 les valeurs communes choisies se justifient également à un ou deux jours près sans difficulté du fait des observations et de la littérature. De plus pour ces trois phases il n'y a pas trop de conséquence à se tromper éventuellement de 1 ou 2 jours. Par contre le choix d'une valeur commune RPR est plus discutable puisqu'après l'initiation paniculaire (IP) la plante doit mettre en place toutes les feuilles initiées non encore développées à cette date, et que leur nombre est variable selon la variété et la longueur de PSP (en relation à la réponse de la plante à la photopériode). Cependant les très nombreuses observations (dont observations d'IP) ayant donné lieu au « modèle impatience » (Dinkhun et al., 2008) ont témoigné d'une faible variation de la durée RPR, qui ont conduit les auteurs à considérer les RPR comme invariants et de l'ordre de 30 jours. Comme c'est ce module qui est utilisé dans SarraH pour gérer le photopériodisme des variétés nous avons repris cette hypothèse simplificatrice. Enfin nous avons également simplifié le paramétrage du « modèle impatience » en considérant pour l'ensemble des variétés une valeur identique de la photopériode seuil (seuilPP) en dessous de laquelle la sensibilité au photopériodisme est activée, et de même pour la photopériode dite critique en dessous de laquelle l'IP ne peut pas avoir lieu (PPCrit) : nous avons utilisé des valeurs de 13,6 heures (seuilPP) et 11 heures (PPCrit).

Sur la base de ces hypothèses simplificatrices légitimes la démarche a donc consisté pour les mil et sorgho à :

- tout d'abord déterminer pour chaque variété la durée et les degrés-jour correspondant de la phase BPV, ce en se basant sur les dates de semis tardives (après la mi-août) pour lesquelles on sait que PSP est réduite a priori à 1 jour ou à peine 2-3 jours peut-être si le photopériodisme s'exprime encore);
- et ensuite à déterminer à l'aide de SarraH les valeurs des deux autres paramètres de sensibilité au photopériodisme : par comparaison des longueurs semis-floraison mâle observées et simulées pour les différentes dates de semis disponibles pour chaque variété, en faisant donc appel au modèle impatience de SarraH. Cette dernière étape du processus est par nature itérative et implique différentes simulations jusqu'à optimiser les valeurs simulées.

Pour les maïs les choses ont été plus simples puisque nous avons les dates des IP. Une synthèse des valeurs des paramètres gérant les durées des phases est présentée au tableau 4 et au tableau 5 on présente les comparaisons entre dates observées lors des essais et dates simulées par le modèle.

Tableau 4 : paramètres calés gérant les longueurs des phases.

Origine	Variété	SDJLevee	SDJBVP	SDJRPR	PPSens	PPExp
Mil_Niger	HK_CRA_Fertils	60	510	400	0,66	0,12
Mil_Mali	Mil_ML_BbnBoua	60	290	400	0,54	0,05
Mil_Mali	Mil_ML_BbnMisn	60	250	400	0,65	0,18
Mil_Mali	Mil_ML_Cho	60	270	400	0,45	0,09
Mil_Mali	Mil_ML_Sagnon46	60	340	400	0,48	0,08
Mil_Mali	Mil_ML_Souna	60	430	400	0,7	0,11
Mil_Mali	Mil_ML_Toroniou	60	350	400	0,62	0,17
Mil_Sénégal	Souna Sén	60	530	400	0,82	0,11
Mil_Sénégal	Thialack	60	580	400	0,8	0,15
Mil_Sénégal	Sanio	60	630	400	0,47	0,3
Sorgho_Mali	Sor_ML_CSM63	70	340	500	0,76	0,1
Sorgho_Mali	Sor_ML_Kenikeba	70	460	500	0,5	0,05
Sorgho_Mali	Sor_ML_Timari	70	410	500	0,62	0,09
Maïs Sénégal	maïs JC	70	410	460	0,9	0,1
Maïs Sénégal	maïs JL	70	480	500	0,85	0,11
Autres paramètres communs						
Paramètre	SDJMatu1	SDJMatu2	SeuilPP	PPCrit	TBase	TOpt1
Valeur	340	170	13,6	11	11	30

Tableau 5 : dates de floraison mâle observées et simulées pour les essais agronomiques après calage des paramètres.

espèce-lieu	essai	variété paramétrée	date semis	FM50% observ	FM50% simul	écart
MIL_Sénégal	phéno-biom	Souna (moyen)	19/06/2008	25/08/2008	23/08/2008	-2
MIL_Sénégal	phéno-biom	Souna (moyen)	22/07/2008	22/09/2008	20/09/2008	-2
MIL_Sénégal	phéno-biom	Souna (moyen)	19/08/2008	14/10/2008	16/10/2008	2
MIL_Sénégal	autre 2005	Souna	22/07/2005	15/09/2005	20/09/2005	5
MIL_Sénégal	autre 2006	Souna	29/07/2006	22/09/2006	24/09/2006	2
MIL_Sénégal	autre 2007	Souna	20/07/2007	07/09/2007	18/09/2007	11
MIL_Sénégal	phéno-biom	Thialack (moyen)	19/06/2008	01/09/2008	31/08/2008	-1
MIL_Sénégal	phéno-biom	Thialack (moyen)	22/07/2008	25/09/2008	24/09/2008	-1
MIL_Sénégal	phéno-biom	Thialack (moyen)	19/08/2008	18/10/2008	18/10/2008	0
MIL_Sénégal	phéno-biom	Sanio (moyen)	19/06/2008	06/10/2008	07/10/2008	1
MIL_Sénégal	phéno-biom	Sanio (moyen)	22/07/2008	28/10/2008	20/10/2008	-8
MIL_Sénégal	phéno-biom	Sanio (moyen)	19/08/2008	29/10/2008	03/11/2008	5
MIL_Sénégal	autre 2006	Sanio	29/07/2006	22/10/2006	22/10/2006	0
MIL_Sénégal	autre 2007	Sanio	20/07/2007	20/10/2007	19/10/2007	-1
MAIS_Sénégal	phéno-biom	Jaune Court	17/06/2008	14/08/2008	14/08/2008	0
MAIS_Sénégal	phéno-biom	Jaune Court	21/07/2008	16/09/2008	15/09/2008	-1
MAIS_Sénégal	phéno-biom	Jaune Court	18/08/2008	14/10/2008	12/10/2008	-2
MAIS_Sénégal	phéno-biom	Jaune Long	17/06/2008	24/08/2008	23/08/2008	-1
MAIS_Sénégal	phéno-biom	Jaune Long	21/07/2008	21/09/2008	22/09/2008	1
MAIS_Sénégal	phéno-biom	Jaune Long	18/08/2008	19/10/2008	18/10/2008	-1
Mil_Niger	Phéno	HK_CRA_Fertils	17/06/2007	01/09/2007	03/09/2007	2
Mil_Niger	Phéno	HK_CRA_Fertils	16/07/2007	22/09/2007	22/09/2007	0
Mil_Niger	Phéno	HK_CRA_Fertils	20/08/2007	22/10/2007	19/10/2007	-3
Mil_Niger	Phéno	HK_CRA_Fertils	18/09/2008	20/11/2008	19/11/2008	-1
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_BbnBoua	17/06/2007	11/09/2007	14/09/2007	3
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_BbnBoua	16/07/2007	17/09/2007	20/09/2007	3
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_BbnBoua	20/08/2007	11/10/2007	05/10/2007	-6
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_BbnBoua	18/09/2008	03/11/2008	02/11/2008	-1
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_BbnMisn	17/06/2007	02/09/2007	01/09/2007	-1
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_BbnMisn	16/07/2007	18/09/2007	19/09/2007	1
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_BbnMisn	20/08/2007	11/10/2007	08/10/2007	-3
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_BbnMisn	18/09/2008	29/10/2008	31/10/2008	2
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Cho	17/06/2007	28/09/2007	01/10/2007	3
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Cho	16/07/2007	04/10/2007	05/10/2007	1
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Cho	20/08/2007	16/10/2007	14/10/2007	-2
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Cho	18/09/2008	01/11/2008	01/11/2008	0
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Sagnon46	17/06/2007	26/09/2007	22/09/2007	-4
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Sagnon46	16/07/2007	05/10/2007	05/10/2007	0
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Sagnon46	20/08/2007	12/10/2007	12/10/2007	0
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Sagnon46	18/09/2008	06/11/2008	05/11/2008	-1
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Souna	17/06/2007	27/08/2007	25/08/2007	-2
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Souna	16/07/2007	15/09/2007	15/09/2007	0
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Souna	20/08/2007	12/10/2007	13/10/2007	1
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Souna	18/09/2008	12/11/2008	12/11/2008	0
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Toroniou	17/06/2007	05/09/2007	07/09/2007	2
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Toroniou	16/07/2007	23/09/2007	24/09/2007	1
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Toroniou	20/08/2007	12/10/2007	12/10/2007	0
Mil_Mali	Phéno	Mil_ML_Toroniou	18/09/2008	06/11/2008	06/11/2008	0
Sorgho_Mali	Phéno	Sor_ML_CSM63	17/06/2007	23/08/2007	21/08/2007	-2
Sorgho_Mali	Phéno	Sor_ML_CSM63	16/07/2007	13/09/2007	14/09/2007	1
Sorgho_Mali	Phéno	Sor_ML_CSM63	18/09/2008	13/11/2008	14/11/2008	1
Sorgho_Mali	Phéno	Sor_ML_Kenikeba	17/06/2007	28/09/2007	28/09/2007	0
Sorgho_Mali	Phéno	Sor_ML_Kenikeba	16/07/2007	03/10/2007	03/10/2007	0
Sorgho_Mali	Phéno	Sor_ML_Kenikeba	18/09/2008	22/11/2008	20/11/2008	-2
Sorgho_Mali	Phéno	Sor_ML_Timari	17/06/2007	10/09/2007	09/09/2007	-1
Sorgho_Mali	Phéno	Sor_ML_Timari	16/07/2007	23/09/2007	24/09/2007	1
Sorgho_Mali	Phéno	Sor_ML_Timari	18/09/2008	18/11/2008	17/11/2008	-1

Les résultats présentés au tableau 5 indique que l'on arrive très bien à simuler les durées des phases, en particulier la durée semis – floraison mâle, sur l'ensemble des variétés étudiées, et ce tout en ayant fait un effort de simplification et d'homogénéisation des paramètres.

III.2.ii. Paramètres gérant le bilan hydrique

On ne décrira pas ici en détail le bilan hydrique du modèle SarraH. On précisera juste que la transpiration potentielle de la culture découle de l'évapotranspiration de référence (ET_o), de la part d'énergie qui est interceptée par le couvert (dépend du LAI et du K_{df}, coefficient d'interception du rayonnement PAR) et d'un paramètre de type K_c fixant le niveau maximal possible de consommation (K_{cmax}), selon l'équation suivante :

$$\text{Transp.Pot} / \text{ET}_o = \text{K}_{c\text{max}} \times (1 - e^{-(\text{K}_{df} \times \text{LAI})})$$

La valeur du paramètre K_{cmax} détermine donc le niveau d'évapotranspiration potentielle de la culture, c'est-à-dire sa consommation potentielle. Si on se base sur les références de la FAO on ne peut pas dépasser un niveau d'évapotranspiration (ET_c) de 1,25 fois l'ET_o pour les céréales (FAO, 1998). Cependant divers travaux montrent que pour les conditions d'Afrique de l'Ouest on peut atteindre des niveaux d'ET_c de plus de 1,5 fois l'ET_o (Dancette, 1983; Affholder, 1997). Sur ces bases nous avons opté pour une valeur de K_{cmax} égale à 1,5 qui permet d'obtenir des niveaux d'évapotranspiration ET_c de 1,4 fois l'ET_o pour un LAI de 3 m²/m² qui correspond à une culture bien développée.

III.2.iii. Gestion des développements des biomasses aériennes

Les paramétrages retenus sont présentés au tableau 6. Ils résultent d'une démarche holistique et simplificatrice : « holistique » au sens où l'on se base sur l'ensemble des observations disponibles pour aboutir à un jeu de paramètres donnant satisfaction et « simplificatrice » au sens où l'on cherche à utiliser le plus possible de valeurs communes entre variétés d'une même espèce, voire pour des espèces différentes.

Tableau 6 : paramètres calés gérant les développements des biomasses

Origine	Variété	KRdtPotA	KRdtPotB	PFactor	SlaMin	SlaMax	SlaPente	FeuilAeroBase	FeuilAeroPente	TxConversion	TxResGrain	Kdf
Mil_Niger	HKP	0,3	800	0,55	0,0013	0,006	0,30	0,65	-0,000150	4,4	0,5	0,5
Mil_Mali	Boboni	0,3	800	0,55	0,0013	0,006	0,30	0,65	-0,000150	4,4	0,5	0,5
Mil_Mali	Choho	0,2	800	0,55	0,0013	0,006	0,15	0,65	-0,000080	4,4	0,5	0,5
Mil_Mali	Sagnon46	0,3	800	0,55	0,0013	0,006	0,30	0,65	-0,000150	4,4	0,5	0,5
Mil_Mali	Souna-Mali	0,3	800	0,55	0,0013	0,006	0,30	0,65	-0,000150	4,4	0,5	0,5
Mil_Mali	Toroniou	0,3	800	0,55	0,0013	0,006	0,30	0,65	-0,000150	4,4	0,5	0,5
Mil_Sénégal	Souna et IBMV	0,4	800	0,55	0,0017	0,008	0,30	0,65	-0,000080	4,4	0,5	0,5
Mil_Sénégal	Sanio	0,4	800	0,55	0,0017	0,008	0,30	0,65	-0,000037	4,4	0,5	0,5
Mil_Sénégal	Thialack	0,4	800	0,55	0,0017	0,008	0,30	0,65	-0,000073	4,4	0,5	0,5
Sorgho_Mali	CSM63	0,2	1000	0,5	0,0013	0,009	0,35	0,60	-0,000110	4,4	0,5	0,5
Sorgho_Mali	Kenikeba	0,4	1000	0,5	0,0013	0,009	0,35	0,60	-0,000110	4,4	0,5	0,5
Sorgho_Mali	Timari	0,2	1000	0,5	0,0013	0,009	0,35	0,60	-0,000110	4,4	0,5	0,5
Mais_Sénégal	mais JC et JL	1,3	1000	0,5	0,0015	0,005	0,30	0,66	-0,000078	4,4	0,65	0,6

Les relations allométriques gérant les répartitions de biomasse aérienne entre les tiges et les feuilles sont tirées des observations (cf. figure 4).

Une seule et unique relation allométrique commune à toutes les céréales a été utilisée pour gérer la répartition de la biomasse totale entre les parties aériennes et les racines.

Pour les SLA on s'est efforcé de respecter les valeurs maximales et minimales observées.

Pour toutes les variétés on s'est basé sur une valeur maximale du coefficient de conversion de l'énergie (ϵ_b) de 4,4 g/MJ/jour. Cette valeur est tirée de la littérature sachant que dans SarraH elle gère la conversion en biomasse totale (parties aériennes et souterraines) du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) intercepté qui ne représente que 48% environ du rayonnement global (RG). Dans la littérature il est cité en effet des valeurs de l'ordre de 1,9 à 2 grammes de biomasse aériennes (BiomA) par MJ de RG (Van Oosterom et al., 2002 ; Sinclair and Muchow, 1999 ; Ong and Monteith, 1985), ce qui conduit à des valeurs de 4,2 à 4,9 grammes de biomasse totale par MJ de PAR.

Cependant l'analyse des résultats indique que cette valeur est parfois trop forte même lorsque l'on simule des cultures en essais agronomique : en d'autres termes, même en condition d'essai agronomique on n'a pas toujours des conditions agronomiques optimales et cela se traduit par une efficacité globale plus faible de la photosynthèse. Cette réalité et l'importance de la valeur de ce coefficient (ϵ_b) pour expliquer le niveau de développement et de production de la culture sont illustrées aux figures 7 et 8. La figure 7 présente ainsi des valeurs de biomasses et rendements simulés par le modèle pour du mil souna 3 pour différentes valeurs du ϵ_b , en l'absence de contrainte hydrique.

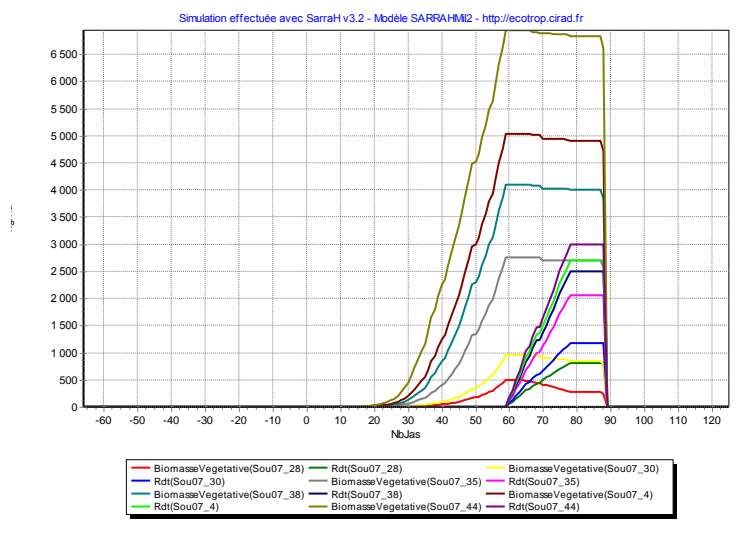
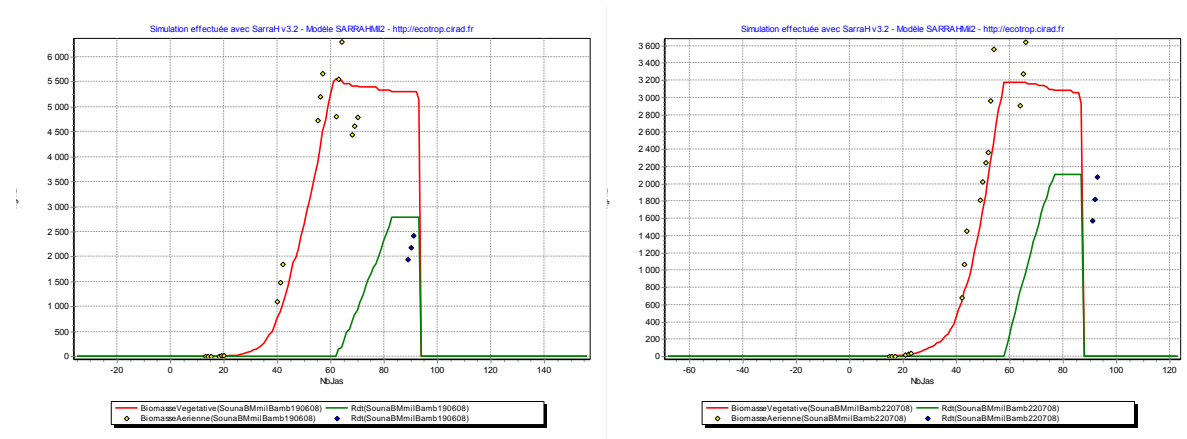


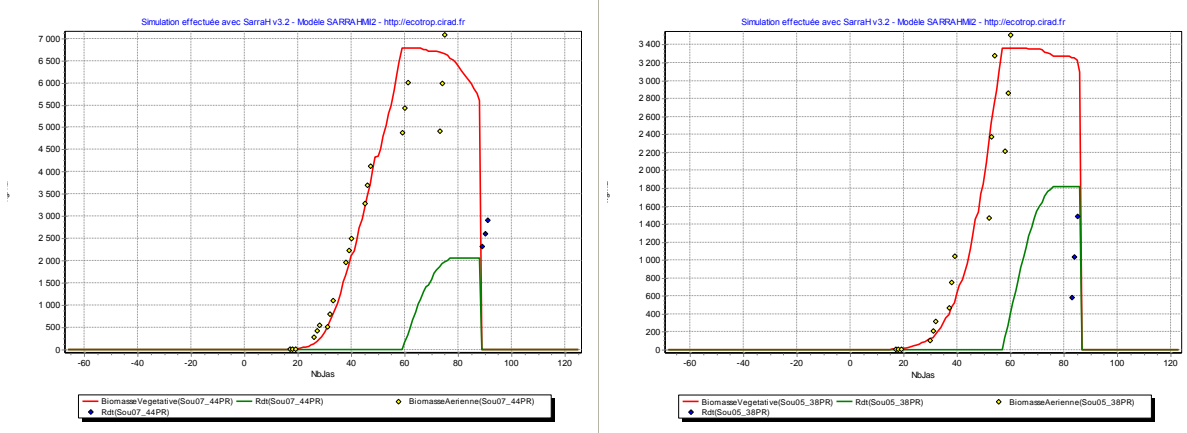
Figure 7 : données simulées de biomasses végétatives (tiges+feuilles) (kg/ha) et rendements grains (kg/ha) pour du mil Souna sans stress hydrique en relation à 6 niveaux de conversion ϵ_b (4,4 ; 4,0 ; 3,8 ; 3,5 ; 3,0 et 2,5 g/MJ) (année 2007, Bambey, conditions hydriques artificielles).

Par le fait de faire passer le ϵ_b de 4,4 à 2,8 g/MJ on obtient des variations de biomasse végétative (tiges+feuilles) et de rendements en grains allant respectivement de 7 à 0,5 Tonnes/ha et de 3 à 0,8 T/ha. On note que pour un ϵ_b réduit à 3,5 g/MJ le rendement peut encore être de 2 T/ha, ce qui est un très bon rendement paysan, mais qu'avec un ϵ_b de 3 g/MJ on ne dépasse pas 1,2 T/ha.



a) Semis 19/06/08 - Eb = 4

b) Semis 20/07/08 – Eb = 3,5



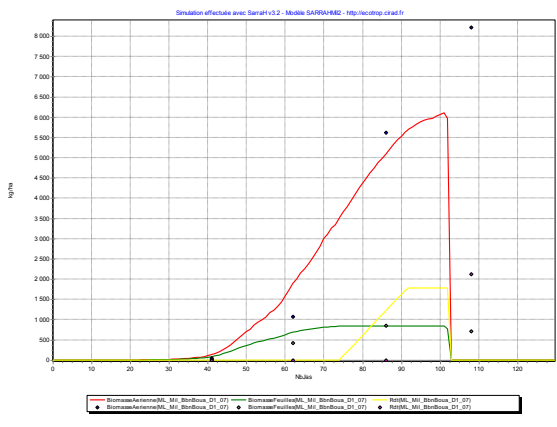
c) Semis 20/07/07 – Eb = 4,4

c) Semis 22/07/05 – Eb = 3,8

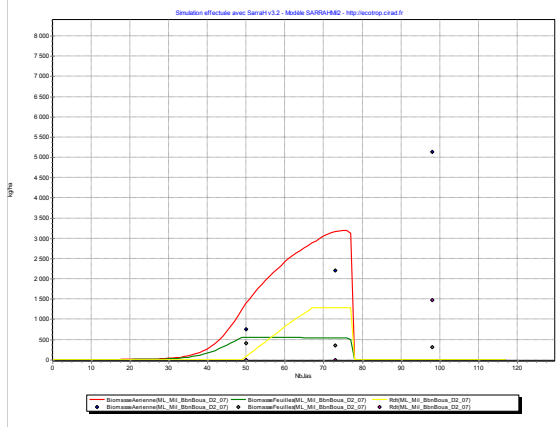
Figure 8 : comparaisons de données observées et simulées de biomasses végétaives (tiges+feuilles) (kg/ha) et rendements grains (kg/ha) pour du mil Souna lors de 4 essais agronomiques à Bambey.

Les figures 8a à 8d comparent les données observées et simulées de biomasses végétaives (tiges+feuilles) (kg/ha) et rendements grains (kg/ha) pour le mil Souna lors de 4 essais agronomiques à Bambey réalisés de 2005 à 2008 : pour simuler correctement chaque essai on a dû ajuster la valeur du ϵ_b . Seul le cycle semé le 20 juillet 2007 a été simulé avec un ϵ_b de 4,4 g/MJ (figure 8c) et il faut noter que le rendement de cet essai est limité par un stress hydrique.

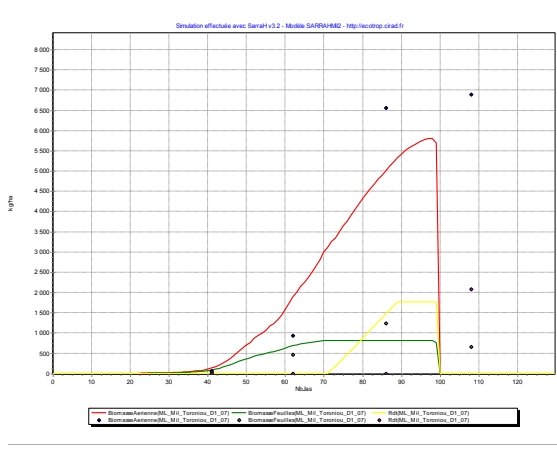
Les figures 9a à 9l présentent les mêmes résultats issus de la procédure de calage des paramètres pour différentes variétés de mil et sorgho du Mali, et pour le maïs « jaune court » du Sénégal.



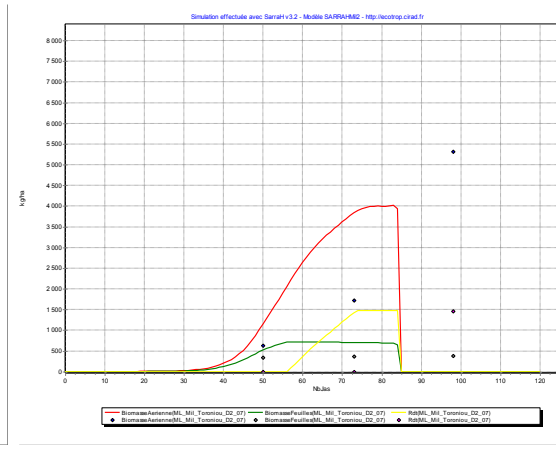
a) Mil Boboni semis 1 2007



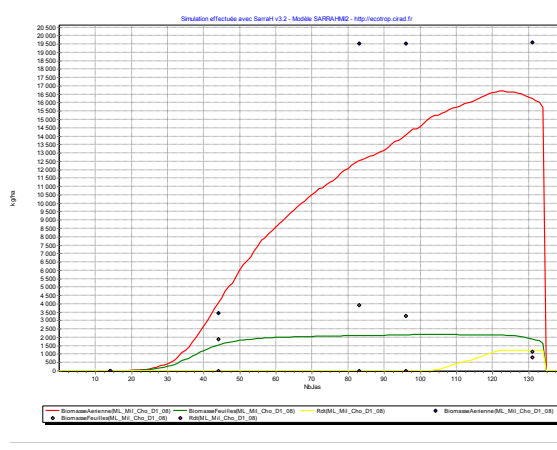
b) Mil Boboni semis 2 2007



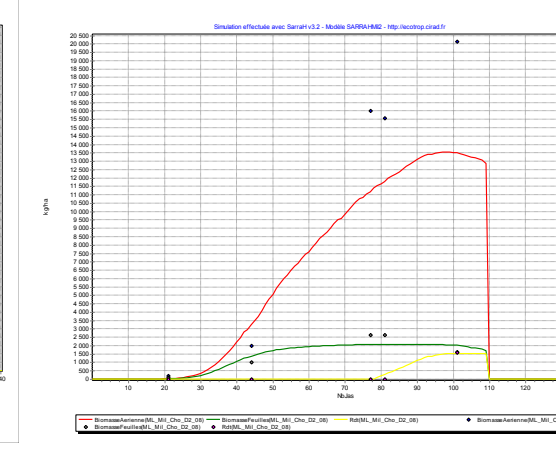
c) Mil Toroniou semis 1 2007



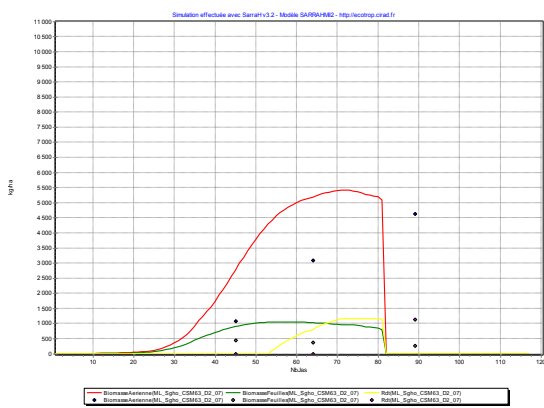
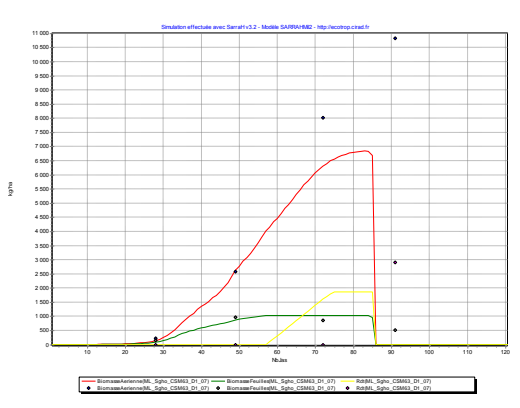
d) Mil Toroniou semis 2 2007



e) Mil Choho semis 1 2008

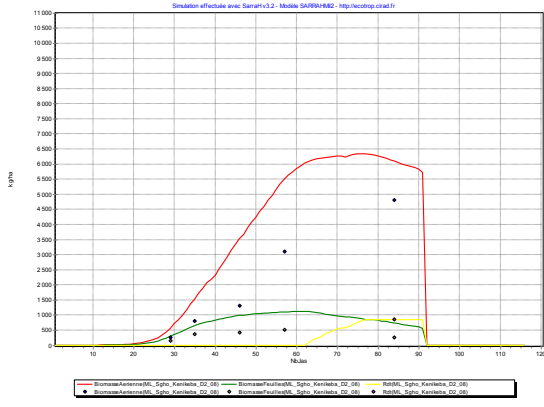
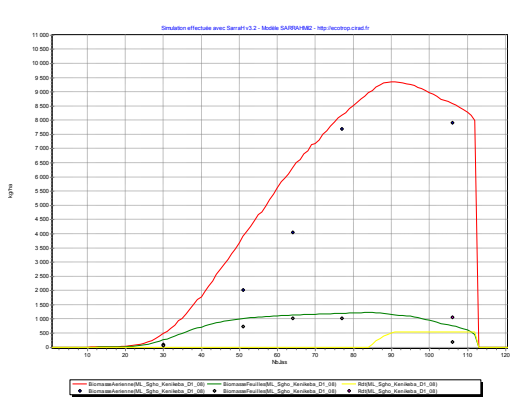


f) Mil Choho semis 2 2008



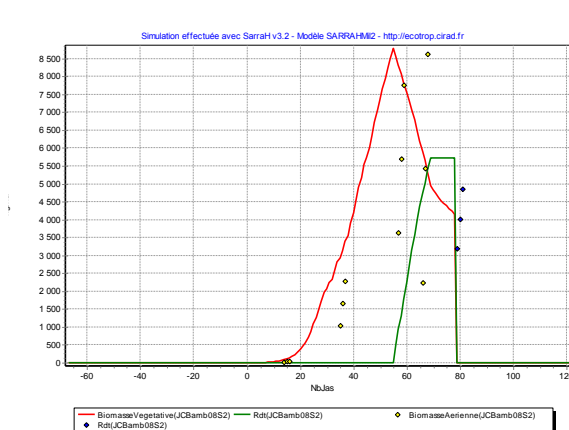
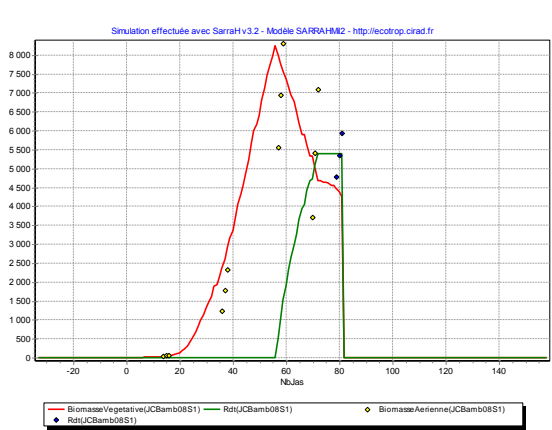
g) Sorgho CSM63 semis 1 2007

h) Sorgho CSM63 semis 2 2007



i) Sorgho Kénikéba semis 1 2008

j) Sorgho Kénikéba semis 2 2008



k) Maïs JC semis 1 2008

l) Maïs JC semis 2 2008

Figure 9 : comparaisons des données observées et simulées de biomasses aériennes (kg/ha) et rendements grains (kg/ha) pour différentes variétés de mil et sorgho du Mali et pour le maïs « jaune court » (JC) du Sénégal.

Les résultats montrés sont représentatifs de l'ensemble des résultats obtenus : ils sont globalement bons mais on note cependant quelques discordances fortes entre valeurs simulées et observées au niveau des rendements (cas CSM63 semis 1 2007 et Kénikéba semis 1 2008) et/ou des biomasses aériennes (cas de Boboni semis 2 2007, Choho semis 2 2008, CSM63 semis 1 2007). Les différences entre valeurs simulées et observées peuvent bien entendu s'expliquer par des mauvais choix des valeurs des paramètres, voire même par des défauts du modèle. Cependant ils peuvent également provenir d'erreurs dans les mesures faites. Il faut souligner ici que l'on a en fait très peu de données relatives à chaque variété (sauf pour le Souna du Sénégal). Par ailleurs les données de biomasses et de rendements provenant du Mali ont été obtenues dans des essais sans irrigation de complément et parfois il y a des contraintes hydriques qui rendent plus compliqué le processus de calage.

Cependant les résultats présentés permettent de considérer :

- que d'une part le modèle rend très bien compte des spécificités de l'ensemble des variétés en termes de longueurs des phases et cycles ;
- qu'il permet également de rendre compte de façon satisfaisante des développements des biomasses et surtout des rendements en grains pour la grande majorité des situations, même si on peut noter quelques discordances en particulier en ce qui concerne les biomasses ;
- et qu'en faisant varier seulement valeur du paramètre de conversion de l'énergie lumineuse interceptée (ϵb) on modifie fortement le potentiel de développement et de rendement des plantes.

IV. Variabilité des rendements paysans

IV.1. Précisions sur les conditions agricoles dans les zones d'étude

IV.1.i. Sénégal – Mil : départements de Diourbel et Kafrine

Dans le département de Diourbel le mil est la seule céréale cultivée. On peut considérer qu'il ne bénéficie jamais à l'heure actuelle d'apports d'engrais minéraux car le cas n'a été relevé que 2 fois sur environ 450 parcelles suivies (2006, 2007, 2008). Le maintien d'un certain niveau de fertilité est assuré de deux façons : soit par des apports organiques, et le mil est alors cultivé en monoculture, soit par la rotation avec une légumineuse qui est principalement l'arachide, mais également le niébé qui se substitue de plus en plus à l'arachide depuis quelques années du fait des problèmes de la filière arachide et surtout du manque de semences. Ces modes de gestion de la fertilité sont présents en différentes proportions selon la position du champ : dans les champs proches des habitations, dits « de case », le mil est cultivé en monoculture année après année, avec des apports de fumier et/ou du parcage, en plus des rejets organiques familiaux. Il n'y a en principe pas de rotation avec l'arachide et/ou le niébé dans ces champs. Pour les champs plus éloignés (on les appellera « champs de brousse ») on peut avoir soit une monoculture de mil durant plusieurs années, gérée avec des apports organiques (fumier transporté et/ou parcage), soit des rotations avec l'arachide et/ou le niébé. On peut rencontrer encore parfois une période courte de jachère au niveau des champs de brousse. Il faut préciser aussi qu'il n'y a aucun apport organique sur l'arachide et très rarement minéral (P et K) à l'heure actuelle sur l'arachide.

La grande majorité des semis se fait à sec avant l'arrivée des pluies, en général entre le 20 mai et le 5 juin. A l'arrivée de la première pluie jugée utile (en général plus de 15 mm) les paysans se précipitent pour semer les parcelles non encore semées. On a ainsi des dates de semis très groupées, souvent une seule par village, parfois 2 ou 3. Les semis se font quasiment tous au semoir attelé (tiré par 1 cheval). Les parcelles sont nettoyées, en général en mai, des principaux résidus de végétation encore présents, manuellement et avec brûlis le plus souvent, ceci de façon à faciliter le passage du semoir attelé. Il n'y a pas de labour (ni en fin de cycle non plus). Il n'y a pas non plus d'usage de pesticide. Les semences proviennent de la récolte précédente. Au cours du cycle on procède en général à 3 sarclo-binages effectués avec une houe légère attelée (« houe sine »).

La géométrie de semis est « en carrés » avec des écartements entre poquets et entre lignes de l'ordre de 90 cm, ce qui donne une densité de poquets de l'ordre de 12.400 poquets à l'hectare. Les agriculteurs effectuent un démariage laissant en moyenne 4 à 5 plantes par poquet.

Aux dires des paysans du département de Diourbel il semblerait que les niveaux de fertilité sont en baisse car selon eux on assiste à un développement de plus en plus important du striga (*striga spp*), plante parasite caractéristique des milieux pauvres. Selon eux on commencerait même à l'observer sur certains champs de case. Ce constat rapporté par les paysans semble refléter la réalité puisque Niane Badiane et al. (2000) indique une diminution des contenus en matière organique dans les champs de brousse de la région.

Les sols du département sont d'origine sableuse : les sols majoritaires sont des sols sableux appelés localement « Dior » (70% des superficies) avec moins de 10% d'argiles et limons, et des réserves utiles de l'ordre de 80-90 mm/m. Les autres sols sont légèrement plus argileux : les plus argileux sont les sols « deck » dont la réserve utile peut atteindre 110-120 mm/m, et on a des sols intermédiaires « dior-deck » et/ou « deck-dior » (Hamon, 1980 ; Imbernon, 1981 ; Cissé, 1986 ; Niane Badiane et al., 2000).

Dans les villages les plus au sud du département de Kafrine où nous avons travaillé (Mabo et Nganda) on peut trouver un peu de maïs dans certains champs très proches des habitations qui sont des sortes de « jardins potagers », et également un peu de sorgho parfois dans le terroir villageois. Ceci étant, le mil reste la céréale largement majoritaire. Dans les villages au nord (Sagna, Boulel et Delby) les conditions sont semblables à celles de Diourbel et on ne trouve que du mil comme céréale. Dans les villages au sud la proportion de sols dior-deck à deck est plus importante, et l'arachide est également plus présente dans le paysage (dans les champs de brousse). Les pratiques sont globalement les mêmes. Cependant les densités de semis peuvent être plus élevées sur les champs semés avec du Thialack : les écartements peuvent y être réduits à 60-70 cm, donnant des densités de l'ordre de 28.000 poquets à l'hectare.

IV.1.ii. Sénégal – Maïs : zone de Missirah (Tambacounda)

Le maïs est la culture céréalière dominante dans le paysage. On trouve également du sorgho et du mil, de type Sanio essentiellement, et aussi de type Souna. On a par ailleurs du coton, de l'arachide et du niébé. Parmi les céréales le maïs est la culture qui bénéficie le plus d'attention. Il est cultivé en champ de case, en monoculture, bénéficiant souvent d'importants apports organiques par parcage, et en champs de brousse en rotation avec l'arachide et/ou le coton (par exemple coton-maïs-arachide

et/ou coton-maïs-arachide-sorgho/mil), avec des quantités d'apports organiques variables et provenant d'apports de fumier essentiellement. Moins de 20% des parcelles bénéficient de fertilisant minéral (engrais), cette proportion étant fortement variable d'un village à l'autre: entre 10% et 40% des parcelles selon les villages, et en général pas sur les champs de case.

Il y a toujours un travail du sol : soit un véritable labour, à la charrue tractée par des bœufs, mais qui est peu profond (15-20 cm), soit un simple grattage à la houe (moins de 10 cm).

Le maïs est fréquemment cultivé en association à la courge et/ou au niébé.

Le contrôle des adventices se fait principalement de façon mécanique avec entre 2 et 4 passages de houe sine. Les herbicides sont utilisés sur environ 20% des parcelles, en pré-levée. Il s'agit souvent d'herbicide « détourné » du coton. Il n'y a pas d'usage d'autres pesticides.

Les semis sont en général fortement étalés dans le temps. Ils dépendent bien entendu de la pluviométrie (les sols doivent être humides pour être labourés), mais également des priorités de chaque agriculteur en relation à l'ensemble de ses spéculations : en particulier le plus souvent celui-ci va semer tout d'abord son coton. Ainsi on peut avoir au sein d'un même village un étalement de plus d'un mois entre les différents semis de maïs.

Les écartements entre lignes sont de l'ordre de 70-80 cm. Les écartements sur la ligne, et la densité, varient fortement d'une parcelle à l'autre (et souvent au sein d'une même parcelle) en relation à la qualité du semis, puis aux conditions de levées : ainsi en début de cycle après levée on a pu observer des densités allant de 40.000 à 160.000 pieds à l'hectare. En fin de cycle on a des densités fortement variables également : entre 15.000 et 70.000 pieds/Ha, avec une moyenne de 30.000 pieds/Ha. Par comparaison la densité recommandée est de l'ordre de 60.000 pieds/ha.

Les sols sont de type deck avec des réserves utiles de l'ordre de 120 mm/m (Cortier et al., 1988).

IV.1.iii. Niger – Mil : degré carré Niamey

La zone est essentiellement réservée à la culture pur du mil ou associée avec le niébé. Il n'y a pas d'autres céréales ni d'autres cultures du fait de la faible pluviométrie et de la pauvreté des sols.

Les sols sont à dominante sableuse (Alkama, Tanabéri, Karé, Berkiawel, Sadoré). Ils sont un peu dunaires dans certains villages (Banizoumbou, Wankama, Gardama kouara, et tendent plutôt vers la texture argileuse et rocailleuse dans d'autres (Koyria, Torodi). Ils sont très pauvres en phosphore, en azote et en matière organique, dans tous les villages, exceptés celui de Tanabéri (où ils sont mieux protégés par un couvert ligneux plus abondant et bénéficient d'un apport d'engrais plus important) et celui de Sadoré (un village peul où la fertilité du sol est entretenue par la cohabitation agriculture/élevage donnant lieu à des apports de fumier assez réguliers et à des parcages directs d'animaux dans les champs). Le même mode d'exploitation qu'à Sadoré s'observe à Alkama, un village qui se situe dans le lit du Dallol Bosso (où la nappe affleure par endroit en surface). Les semis de mil se font toujours à la première pluie utile (c'est-à-dire jugée suffisante par le paysan pour faire germer les graines). Toutefois, on assiste souvent à des semis qui ratent (donc à plusieurs ressemis), du fait des sécheresses qui s'observent assez fréquemment en début de saison. Face à cette situation, les paysans sèment majoritairement des

variétés précoces (HKP). Certains font également recours aux variétés très photopériodiques comme la Somno, cultivée par presque 10 % des paysans à Banizoumbou et Tanabéri et 100 % à Torodi. Le semis se fait à la main à l'aide des outils traditionnels et archaïques (houe manuelle), sans rayonnage. Il n'y a pas de règle pour le démariage qui peut se faire à 2 plants/poquet, tout comme à 10 plants/poquet (voire plus), selon les champs et même les personnes qui le font dans un même champ. Ceci donne lieu à une grande variabilité de la densité de semis, à l'intérieur d'un même champ et d'un champ à un autre. Il y a très rarement labour avant semis. Néanmoins certains paysans (les plus nantis) procèdent à un grattage superficiel (à la charrue attelée), particulièrement dans les parties argileuses et/ou rocailleuses du champ (Torodi, Koyria). Deux sarclages manuels sont généralement faits à l'hilaire (à la daba manuelle à Torodi) durant le cycle de la culture (le premier, pendant le tallage et le second, pendant la montaison). Toutefois, ces sarclages sont souvent faits en retard dans certains champs (ceux de brousse surtout). Chez les paysans moins nantis et ceux qui ne disposent pas de main d'œuvre, le second sarclage est souvent boycotté. Ceci donne souvent lieu à une présence importante d'adventices.

IV.1.iv. Mali : zones de Koutiala et Cinzana

Les paysans n'apportent pas de fertilisation minérale sur le mil et sorgho que ce soit à Cinzana ou à Koutiala. Pour le Maïs, ils apportent de la fumure minérale (urée et phosphore). L'apport de la fumure organique est une pratique courante : soit parage des animaux qui séjournent pendant la saison sèche dans le champ de l'agriculteur (suivant la nature des relations agriculteur/éleveur l'agriculteur verse un montant forfaitaire mensuel ou un paiement en nature) ; soit fumier de parc pour les paysans qui possèdent des animaux ou des ordures ménagères. Dans tous les cas il est très difficile de quantifier exactement la dose de fumure organique apporté par les agriculteurs.

Les pratiques agricoles diffèrent selon les zones agroécologiques. Dans les zones où les risques pluviométriques sont faibles, comme Koutiala, les céréales sèches bénéficient de l'arrière effet de l'apport des engrais dans la culture du coton et/ou du maïs. La rotation la plus vulgarisée est triennale : Coton-Maïs-Sorgho. A Cinzana où le risque de sécheresse est important les paysans pratiquent des rotations sorgho-sorgho-mil ou mil-mil-sorgho et encore de la culture itinérante traditionnelle jachère-arachide-sorgho-mil. Il faut noter que le mil est la céréale dominante à Cinzana.

Le semis du mil se réalise en moyenne sur un écartement de 0.75 entre les lignes et 0.80 mètres sur la ligne (Koutiala et Cinzana)

Le sorgho est semé avec un écartement de 0.50 mètres entre les poquets et 0.75 entre les lignes à Cinzana et de 0.40 entre poquets et 0.75 entre lignes à Koutiala (un peu plus dense).

Les principaux sols de cultures sont sableux en surface (10-25 cm) et plus argileux en profondeur. Les mils sont cultivés sur des sols sableux, généralement en haut des toposéquences. La culture des sorghos se fait sur les sols lourds, argilo-sableux à argilo-limoneux. Toutefois le sorgho peut aussi être cultivé sur des sols intermédiaires.

IV.2. Rangs et variabilité des rendements paysans

L'ensemble des résultats est présenté en détail en annexe 1. Par ailleurs différentes figures seront présentées par la suite dans le cadre des comparaisons avec les résultats simulés. On se contentera donc ici de ne présenter qu'un tableau (tableau 7) indiquant les principaux résultats villageois par spéculation, année et zone.

Tableau 7 : indicateurs régionaux de production : valeurs moyennes (Moy RDTv), maximales (RDTv max), minimales (RDTv min) des rendements moyens villageois (en kg/ha), coefficients de variation (CV) des rendements moyens villageois (CV% RDTv) et moyennes des CV intra-villageois (Moy CVv) (%).

Culture	Pays	Zone	Année	Moy RDTv (inter-villages)	CV% RDTv (inter-villages)	RDTv max (inter-villages)	RDTv min (inter-villages)	Moy CVv (intra-village)
Mil	Niger	Niamey	2004	963	31%	1605	553	28%
Mil	Niger	Niamey	2005	700	52%	1215	307	27%
Mil	Niger	Niamey	2006	646	32%	997	384	32%
Mil	Niger	Niamey	2007	526	33%	929	369	35%
Mil	Niger	Niamey	2008	581	25%	842	401	33%
Mil	Niger	Niamey	2004-08	683	34%	1605	307	31%
Mil	Sénégal	Diourbel	2006	529	33%	741	304	60%
Mil	Sénégal	Diourbel	2007	569	22%	734	388	43%
Mil	Sénégal	Diourbel	2008	334	10%	365	280	45%
Mil	Sénégal	Diourbel	2006-08	478	22%	741	280	49%
Mil	Sénégal	Kaffrine	2007	628	40%	970	336	49%
Mil	Sénégal	Kaffrine	2008	607	11%	681	510	55%
Mil	Mali	Cinzana	2007	1918	15%	2273	1584	42%
Mil	Mali	Cinzana	2008	1122	11%	1245	916	45%
Mil	Mali	Koutiala	2007	1568	6%	1689	1436	47%
Mil	Mali	Koutiala	2008	1845	11%	2062	1617	42%
Sorgho	Mali	Cinzana	2007	1552	20%	1848	1133	44%
Sorgho	Mali	Cinzana	2008	1002	8%	1137	948	46%
Sorgho	Mali	Koutiala	2007	1623	19%	2076	1344	62%
Sorgho	Mali	Koutiala	2008	2205	18%	2654	1582	34%
Maïs	Sénégal	Tambac.	2006	1892	24%	2610	1442	41%
Maïs	Sénégal	Tambac.	2007	1375	17%	1608	1030	53%
Maïs	Sénégal	Tambac.	2008	1251	17%	1503	922	60%
Maïs	Mali	Koutiala	2007	2126	4%	2193	2058	54%
Maïs	Mali	Koutiala	2008	3001	8%	3196	2741	39%

Pour les 3 cultures on constate que les coefficients moyens de variation intra-villageois sont en général supérieurs à 40% et très souvent supérieurs à 50%. Cela reflète bien la (très) forte variabilité intra-villageoise qui prévaut partout. Cette forte variabilité intra-villageoise s'observe aussi quand les rendements sont plutôt élevés en moyenne au sein d'une région (cas par exemple du mil en 2007 à Cinzana (Mali), en 2007 et 2008 à Koutiala (Mali), du maïs en 2006 à Tambacounda (Sénégal)), c'est-à-dire même quand globalement les conditions de production sont plutôt favorables.

En ce qui concerne le mil on note que les plus faibles niveaux sont observés dans le département de Diourbel (Sénégal) et dans la zone de Niamey (Niger). Les rendements à Diourbel en 2008 sont particulièrement faibles. Les rendements des villages de Kaffrine (Sénégal) sont légèrement plus élevés que ceux de Niamey.

Par contre les rendements en mil des zones de Cinzana et Koutiala au Mali sont beaucoup plus élevés, et ce au niveau de tous les villages de ces zones.

On note que les rendements en sorgho des zones de Cinzana et Koutiala sont également élevés. Il en est de même en ce qui concerne les rendements en maïs de Koutiala qui sont supérieurs à ceux observés au Sénégal à Tambacounda. Le niveau de production en maïs en 2006 dans cette zone est cependant élevé avec près de 2 tonnes par hectare.

On remarque donc que les rendements observés au Mali sont globalement bien supérieurs à ceux que l'on peut observer au Niger (mil) et au Sénégal (mil, maïs). Compte tenu des potentiels de production a priori équivalents des variétés, cela ne peut s'expliquer que par des conditions de culture meilleures dans les zones maliennes étudiées, et ce même dans la région sahélienne de Cinzana où pourtant il n'y a que du mil et du sorgho. Pour celle de Koutiala on peut penser que les mils, sorgho et maïs bénéficient des effets sur les sols des amendements apportés sur la culture du coton. Il est possible également qu'une « expertise » agronomique « de meilleurs soins » se soit développée.

V. Simulations des productions paysannes

V.1. Caractéristiques générales des simulations

V.1.i. Dates de semis et variétés

L'étude des observations de terrain permet de déterminer pour chaque village et chaque année qu'elles sont les « cycles » prépondérants, c'est-à-dire les couples « variété - date de semis » qui représentent la majorité des situations et déterminent le rendement moyen. En effet, sur le plan opérationnel il est difficile d'imaginer qu'il faudra procéder dans le futur à différents jeux de simulation pour chaque site/village. Dans le cas de l'étude présentée ici ces situations sont identifiées par les observations. Bien évidemment en termes d'opérationnalité future il faudra pouvoir disposer de méthodes et informations pour choisir les dates de semis sur la base des informations pluviométriques et des caractéristiques agronomiques locales et considérer une seule variété représentative si possible.

Pour les mils et sorgho, qui se sèment « en vagues » en relation aux pluies, on a en général peu de dates de semis à simuler par village et année. Pour le Sénégal et également le Niger où l'on n'a pratiquement qu'une seule variété par village, la question se résume aux dates de semis, en lien avec les pluies, et les choses sont simples en général, sauf en cas de démarrage erratique de la saison entraînant des échecs et des ressemis. Pour le Mali les choses sont plus complexes car il faut gérer également plusieurs variétés qui parfois peuvent se semer aux mêmes dates, parfois non. Si ces variétés ont globalement les mêmes caractéristiques, alors la réalité peut se simplifier comme c'est le cas au Sénégal et au Niger.

Pour ce qui est du maïs les choses sont rendues complexes du fait de l'étalement des semis : selon les priorités des agriculteurs et l'avancement de la saison des pluies on peut avoir un étalement régulier sur plus d'un mois des dates de semis au

sein de chaque village. Dans le cas de l'étude présentée nous avons choisi de simuler une date de semis par décade en couvrant la période où l'on avait 80% des semis observés.

V.1.ii. Caractéristiques des parcelles

Pour chaque village nous avons considéré un jeu unique de caractéristiques.

Pour le Sénégal on a une homogénéité de ces caractéristiques au sein de chacune des 3 régions d'étude.

V.2. Résultats : comparaisons simulations-observations

V.2.i. Rendements paysan en mil

On présente aux figures 10, 11 et 12 les principaux résultats relatifs au mil obtenus pour le Niger : ils illustrent parfaitement les résultats obtenus par ailleurs en mil (qui seront synthétisés figures 13 et 14), ainsi que sur les autres cultures et les questions soulevées par ces résultats.

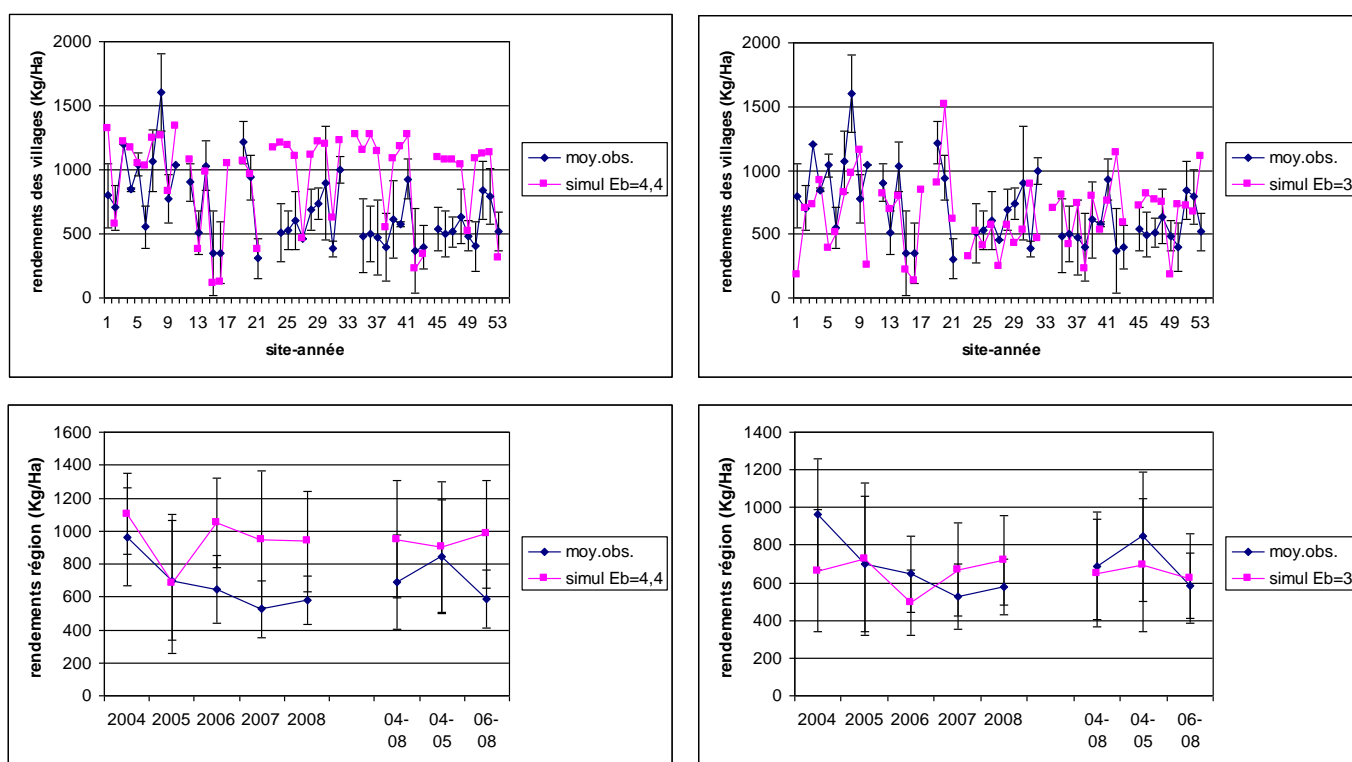


Figure 10 : comparaisons des rendements moyens paysans observés et simulés de mil pour la zone de Niamey pour deux valeurs de ϵ_b (4,4 et 3)

La figure 10 illustre la problématique du passage aux conditions paysannes qui implique de diminuer la valeur du coefficient de conversion de l'énergie lumineuse ϵ_b : pour la zone de Niamey ce coefficient doit être abaissé de 4,4 g/MJ à 3 g/MJ si

l'on veut obtenir une valeur moyenne régionale interannuelle simulée égale à la même valeur observée. Cependant on peut noter, tant au niveau de chaque site-année, qu'au niveau des moyennes régionales annuelles, que cette valeur ne donne pas satisfaction chaque année ni à l'échelle régionale, ni à l'échelle locale : pour 2004 et 2006 les valeurs simulées sont trop faibles, alors qu'elles sont trop fortes pour 2007 et 2008. Ainsi faudrait-il pouvoir utiliser des valeurs ajustées à chaque année pour pouvoir s'ajuster au mieux avec les valeurs moyennes régionales annuelles (cf. figure 11), ce qui n'est évidemment pas une solution car cela n'a pas de sens scientifique ni d'utilité opérationnelle : pour les années 2004 à 2008 il faudrait utiliser successivement des valeurs de 3,8, 3, 3,2, 2,8 et 2,8 g/MJ. On note que ces valeurs diminuent dans le temps.

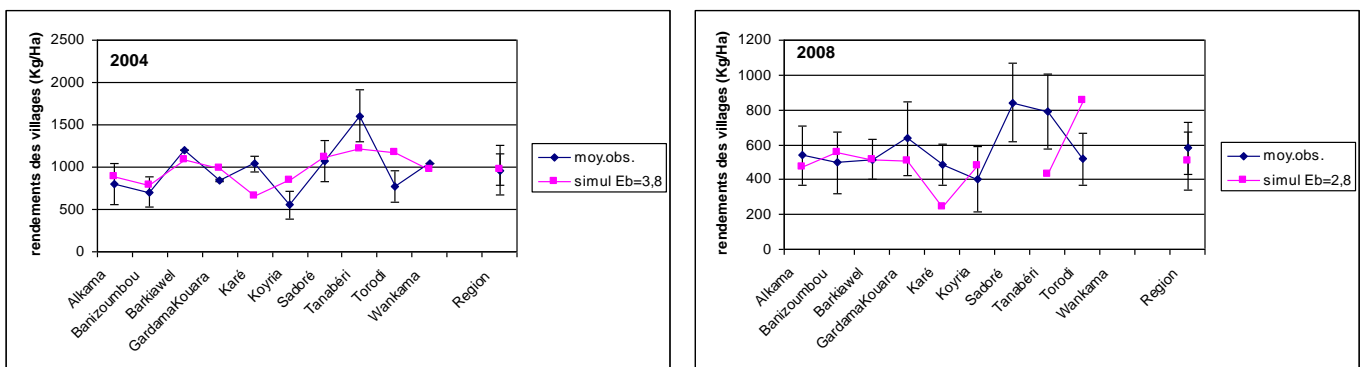
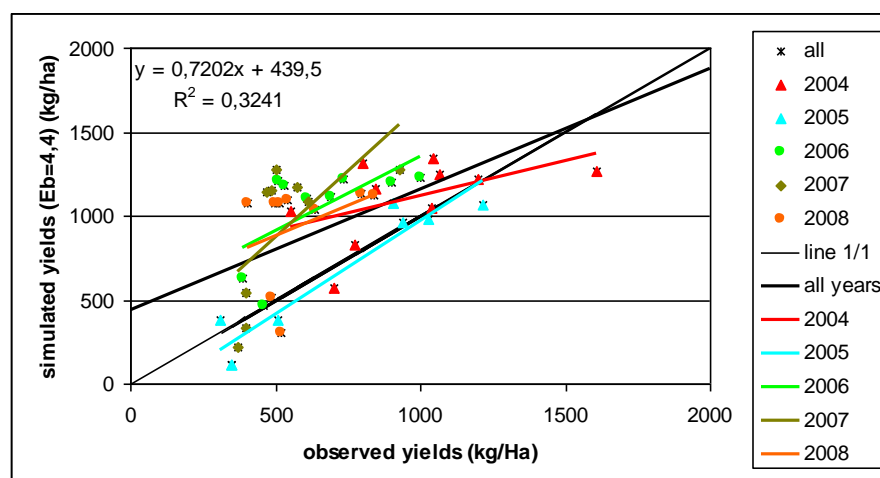


Figure 11 : comparaisons des rendements moyens paysans observés et simulés de mil pour la zone de Niamey pour 2004 ($\epsilon_b = 3,8$) et 2008 ($\epsilon_b = 2,8$)

Le choix d'une valeur unique de ϵ_b (ici 3) pour une zone donnée ne permet donc pas de rendre compte des variabilités inter-annuelle et intra-régionale. La corrélation avec le climat disparaît pratiquement totalement (cf. figure 12 et tableau 8) alors que cette corrélation reste nette quand on travaille avec un ϵ_b plus élevé, même si cependant les valeurs prédites sont surestimées : ainsi le R^2 général passe de 0,32 à 0,07, et les R^2 annuels deviennent dans l'ensemble très faibles (sauf pour 2005).



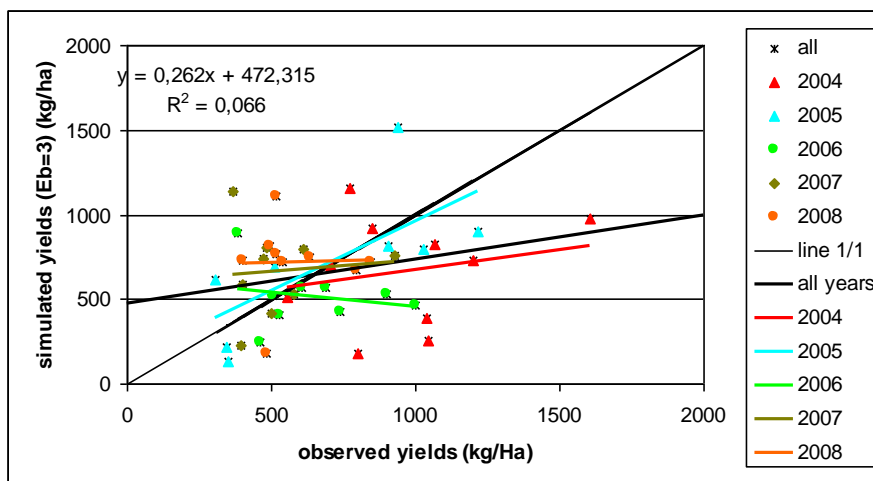


Figure 12 : corrélations entre les rendements moyens paysans observés et simulés de mil pour la zone de Niamey pour $\epsilon_b = 4,4$ (figure 12a) et $\epsilon_b = 3$ (figure 12b)

Tableau 8 : valeurs des coefficients de corrélation (R^2) entre rendements moyens villageois simulés et observées pour la zone de Niamey de 2004 à 2008 pour des valeurs de ϵ_b égales à 4,4 et 3 g/MJ

année	R2 - Eb=4,4	R2 - Eb= 3
2004	0,271	0,047
2005	0,894	0,487
2006	0,408	0,039
2007	0,414	0,009
2008	0,114	0,001
2004-08	0,324	0,066

Avec une valeur unique réduite de ϵ_b la capacité prédictive du modèle devient donc sans intérêt pour décrire la réalité et fournir des prévisions annuelles, même à l'échelle régionale. A l'inverse si l'on considère un ϵ_b élevé (4,4 g/MJ) on a une surestimation la plupart du temps (sauf 2005) mais l'effet du climat est globalement mieux pris en compte et bien qu'il y ait une surestimation la pente est presque idéale (proche de 1/1). Des essais de sensibilité montrent que cette surestimation est fortement liée à la typologie des années : en années fortement pluvieuses le modèle surestime systématiquement.

Les résultats obtenus sur mil au Sénégal, que ce soit sur Diourbel (figure 13) ou Kaffrine (non montré ici car 2 années seulement) montrent des similitudes mais ils sont encore plus décevants. En effet avec $\epsilon_b=4,4$ g/MJ, non seulement on a une très forte surestimation des rendements, mais la corrélation avec la réalité est négative : pour 2007 et 2008 le modèle simule des rendements élevés (entre 1500 et 2000 kg/ha), plus élevés globalement que ceux simulés en 2006, ce qui signifie qu'il détecte des contraintes hydriques mais pas particulièrement pénalisante, alors que la réalité est plutôt catastrophique, mais cependant pas du fait du manque d'eau (commentaires des observateurs et paysans). Et par contre si on travaille avec une valeur unique faible de ϵ_b (2,8 g/MJ pour Diourbel ; 3 pour Kaffrine) on arrive à déterminer le rendement moyen régional interannuel mais on n'a plus de variabilité et cela ne sert donc pas à grand chose.

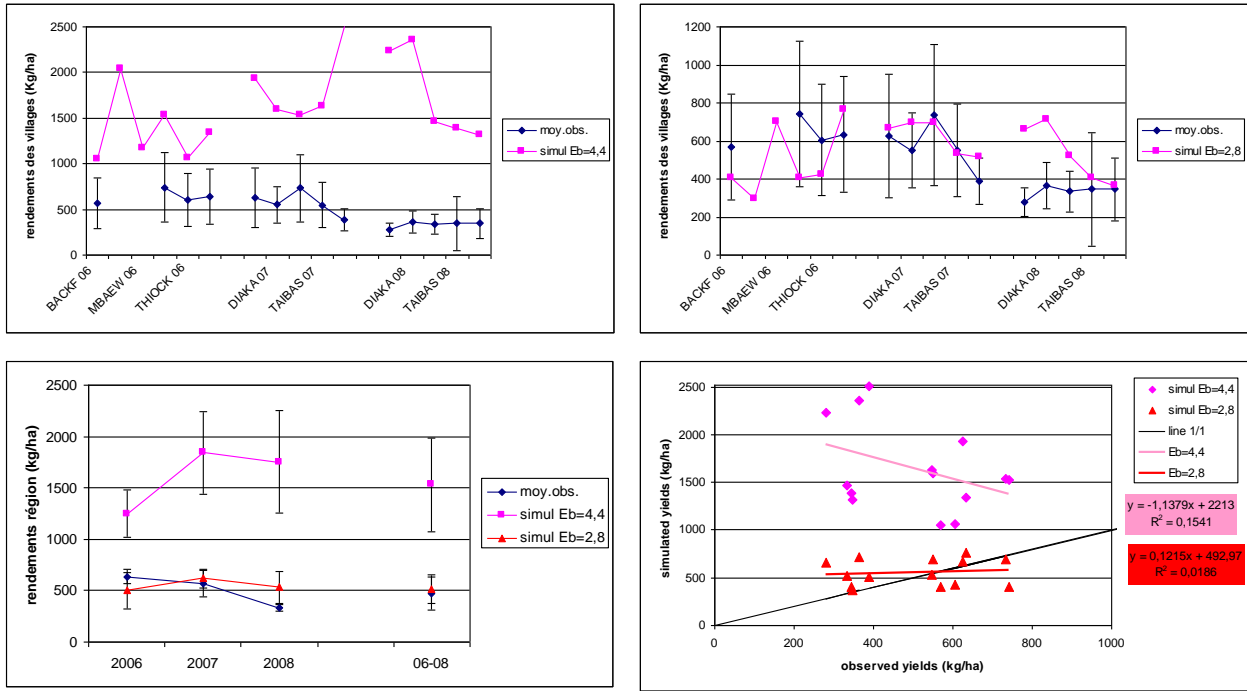


Figure 13 : comparaisons des rendements moyens paysans observés et simulés de mil dans la zone de Diourbel pour deux valeurs de ϵ_b (4,4 et 2,8)

Pour le Mali (figure 14) on observe des choses différentes selon que l'on est à Cinzana ou Koutiala.

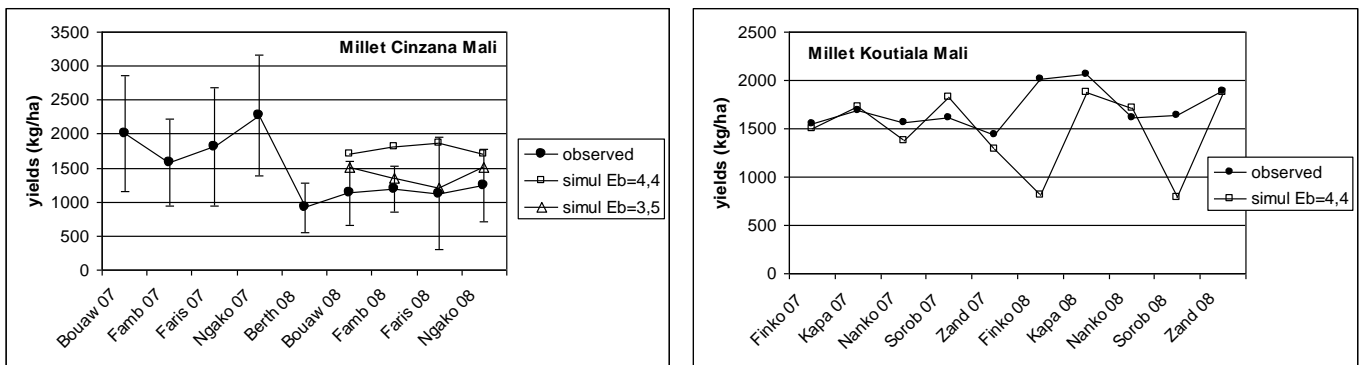


Figure 14 : comparaisons des rendements moyens paysans observés et simulés de mil dans les zones de Cinzana et Koutiala

Pour Cinzana (pour le moment seules les simulations 2008 ont pu être faites faute des données météorologiques 2007) il faut réduire ϵ_b à 3,3-3,5 g/MJ, et ceci alors que les rendements sont relativement élevés (de l'ordre de 1 à 1,2 tonnes/ha).

Pour la zone de Koutiala on a de très bonnes valeurs simulées avec ϵ_b égal à 4,4 g/MJ, à l'exception de 2 valeurs en 2008. Pour ces deux sites le modèle a simulé une contrainte hydrique et a exagéré semble-t-il soit son importance, soit son impact.

Ces deux situations font l'objet d'un réexamen. Les bonnes corrélations obtenues ici avec ϵ_b égal à 4,4 g/MJ, pour des valeurs de rendements de l'ordre de 1500 à 1600 kg/ha, alors que les potentiels variétaux sont de l'ordre de 2500 à 3000 kg/ha, sont la conséquence de stress hydriques modérés et elles indiquent que les cultures se sont développées sous des conditions agronomiques de fertilité et gestion très satisfaisantes.

V.2.ii. Rendements paysan en sorgho

On retrouve dans une certaine mesure pour le sorgho une différence de même type que pour le mil entre les zones de Cinzana et Koutiala. Pour Cinzana il faut abaisser le coefficient de conversion ϵ_b à 3-3,2 g/MJ alors que pour Koutiala cela n'est pas nécessaire. Cependant pour le sorgho à Koutiala il apparaît que les rendements observés en milieu paysans sont supérieurs aux rendements simulés par le modèle.

L'analyse détaillée (en cours) semble montrer dans certaines situations une tendance du modèle à exagérer l'impact du stress hydrique, mais cela n'est pas le cas pour toutes les simulations.

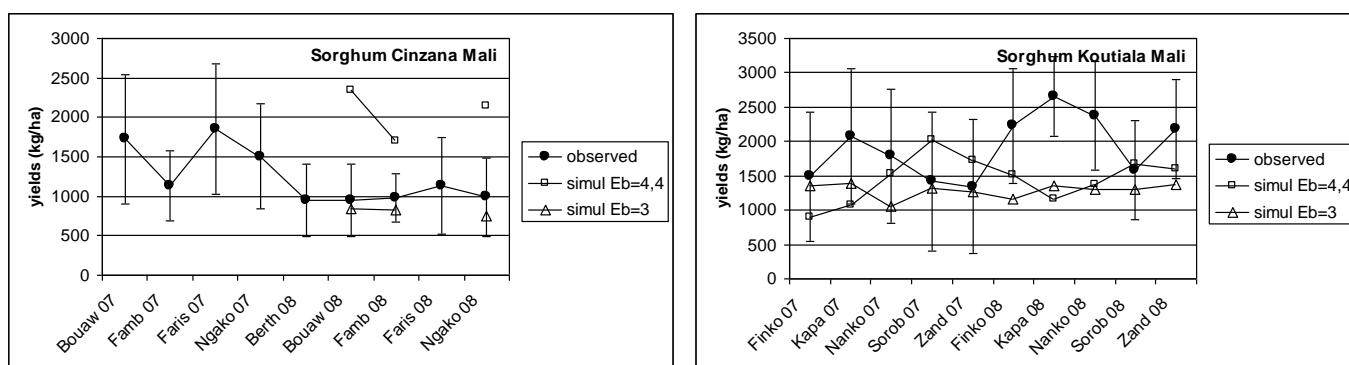


Figure 15 : comparaisons des rendements moyens paysans observés et simulés de sorgho dans les zones de Cinzana et Koutiala

V.2.iii. Rendements paysan en maïs

Pour les cultures de maïs de la zone de Missirah-Tambacounda (Sénégal) (figure 16) les rendements simulés par le modèle avec ϵ_b égal à 4,4 g/MJ sont très largement supérieurs aux observations, en particulier pour 2007 et 2008 : pour ces deux années les rendements simulés sont quasiment tous identiques et proches des potentiels, et cela témoigne qu'il n'y a pas eu de contrainte hydrique, au sens de « manque d'eau ». Pour 2006 les rendements simulés sont moyens, s'étalant entre 3 et 4 tonnes à l'hectare : ils témoignent de contraintes hydriques variables. La réalité diffère totalement des simulations avec des rendements plus élevés en 2006 qu'en 2007 et 2008.

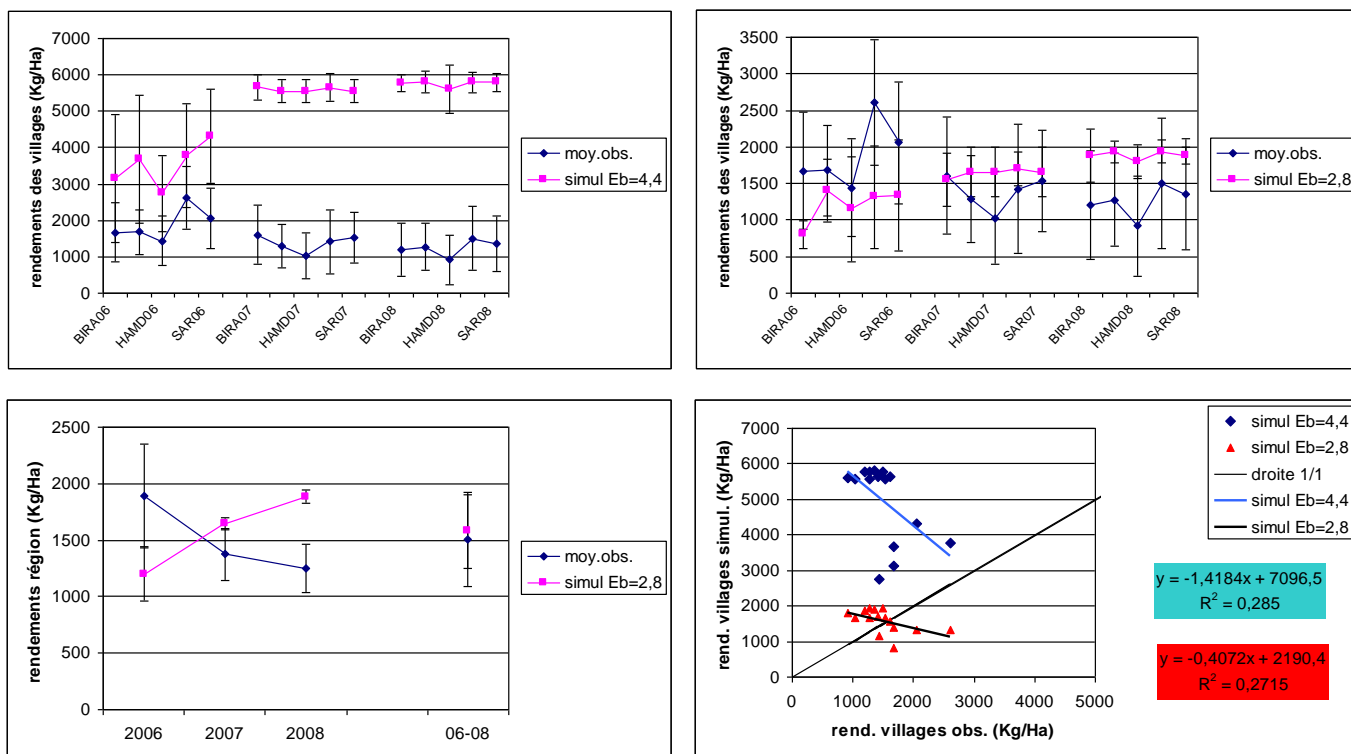


Figure 16 : comparaisons des rendements moyens paysans observés et simulés de maïs dans la zone de Missirah-Tambacounda

Ici on a donc de plus mauvais rendements paysans quand la pluviométrie est abondante. Il faut préciser que les cumuls des hivernages 2006, 2007 et 2008 ont respectivement été de 574, 758 et 1016 mm en moyenne sur la zone. Cela n'est pas surprenant car d'une part le maïs est connu pour sa sensibilité à l'engorgement, qui a certainement dû jouer en 2008 et aussi sans doute en 2007, et d'autre part du fait de la pression des adventices qui deviennent très difficiles à contrôler mécaniquement en cas de pluviométrie abondante. Le recours à une valeur réduite de ϵ_b ne permet pas de rendre compte de la diminution des rendements en relation à une pluviométrie plus abondante.

VI. Comparaisons avec DHC

Pour le moment cette comparaison n'a pu être développée que pour la zone de Niamey.

Elle indique une qualité prédictive bien meilleure de SarraH (cf. figure 12) par rapport à DHC (cf. figure 17). En particulier parce que comme nous l'avons indiqué DHC limite les rendements à 900 kg/ha.

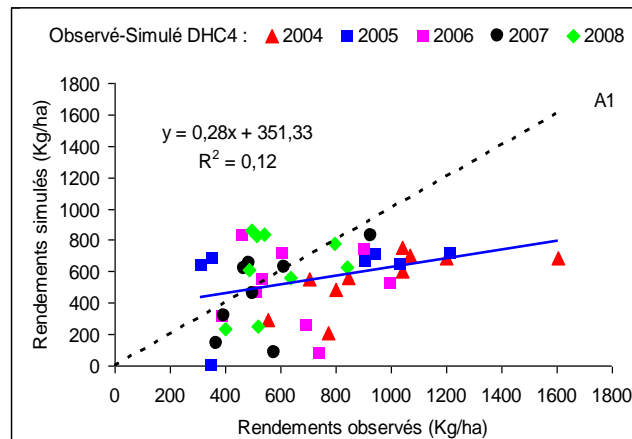


Figure 17 : corrélations entre les rendements moyens paysans de mil observés et simulés par DHC pour la zone de Niamey

Le travail est en cours pour les mils des zones de Diourbel et Kaffrine (Sénégal) ainsi que Cinzana et Koutiala (Mali) (il implique un re-formatage de certaines données). Sans avoir encore ces résultats on peut cependant les anticiper sans trop s'avancer car le bilan hydrique de SarraH est proche de DHC. Ainsi on peut s'attendre à ce que :

- pour les zones à faible productivité DHC devrait donner des résultats a priori similaires à SarraH car pour ces zones ce ne sont pas les contraintes hydriques qui sont limitantes la plupart du temps pour nos jeux d'observations ;
- pour les zones à moyennes et fortes productivités, où les rendements dépassent nettement une tonne à l'hectare, soit pour les zones de Cinzana et Koutiala au Mali, DHC donnera des résultats moins bons car sa fonction de production empirique limite les rendements à 900 kg/ha.

VII. Conclusions

VII.1. Ce que nous enseignent les observations

Cette étude est basée d'abord sur un effort collectif important de recueil de données de terrain en milieu paysan, et également dans le cadre d'essais agronomiques. Concernant la récupération et la mise au propre des données l'état d'avancement est le suivant :

- Les données d'essai et d'enquêtes du Sénégal, du Niger et du Mali ont toutes été traitées et sont exploitables.
- Pour ces pays il manque cependant encore quelques jeux de données climatologiques (Cinzana 2007 en particulier).
- En ce qui concerne le Niger il faut également déplorer l'absence de données d'enquêtes en sorgho car le responsable du travail a disparu.
- Les données d'essai et d'enquêtes du Burkina Faso ont été mises au propre mais présentent à l'évidence des erreurs qui nécessitent de revoir les fiches de saisie de terrain. Ce travail est en cours.
- Par ailleurs il manque pour le Burkina Faso la plupart des informations agroclimatologiques et il semble qu'il soit difficile de les obtenir.

Les données recueillies jusqu'ici permettent de compter sur des jeux de données précis et actualisés concernant les productions paysannes de mil, sorgho et maïs de différentes zones agricoles a priori représentatives. Les principales informations que l'on peut en retirer sont les suivantes :

- Les rendements paysans sont sur l'ensemble des sites et pour toutes les espèces suivies extrêmement variables au sein d'un même village, c'est-à-dire a priori « sous la même pluviométrie » (coefficients de variation supérieurs à 40%, voire à 50%). Cette forte variabilité intra-villageoise témoigne du poids des conditions locales de production et est symptomatique de situations agricoles peu ou pas intensifiées.
- Les rendements en mil sont particulièrement faibles dans la zone de Diourbel (Sénégal), ainsi que dans celle de Niamey (Niger), et un peu moins faibles dans celle de Kaffrine (Sénégal).
- Ils sont bien supérieurs dans la zone de Cinzana (Mali) et surtout dans celle de Koutiala (Mali) qui est une zone d'agriculture cotonnière intensifiée.
- Ainsi les rendements simulés avec les paramétrages théoriques établis suite aux essais agronomiques sont toujours bien supérieurs aux observations, sauf pour les mil de Koutiala.
- Les rendements observés en sorgho (zones de Cinzana et Koutiala uniquement) sont plus élevés que ceux en mil.
- Pour la zone de Koutiala les rendements observés en sorgho apparaissent supérieurs aux rendements simulés par le modèle.
- Rappelons aussi que l'on a plus de diversité au niveau des variétés au Mali, que ce soit en mil ou sorgho, et ce plus dans la zone de Koutiala (plus humide) que dans celle de Cinzana.
- Dans les zones d'étude au Niger et au Sénégal on a le plus souvent une seule variété par village, rarement 2.
- Les rendements en maïs au Sénégal (zone de Missirah-Tambacounda) sont également bien inférieurs aux valeurs simulées d'après les caractéristiques

potentielles des variétés : de l'ordre de 50% du possible pour l'année 2006 ayant une pluviométrie réduite, puis de l'ordre d'à peine 20% pour les années 2007 et 2008 aux pluviométries non limitantes, voire excédentaire en 2008.

- Les rendements en maïs de la zone de Koutiala (2 villages en 2007 ; 3 en 2008) x 2 années) sont assez élevés, de l'ordre de 2 à 3 tonnes à l'hectare. Les simulations n'ont pas encore pu être réalisées pour ces maïs faute de caractérisation directe en essai, mais cependant si l'on se réfère aux caractéristiques des maïs cultivés au Sénégal, on peut estimer ces niveaux de production à environ 50% du rendement attendu découlant des conditions agroclimatiques.

En synthèse on a donc de façon générale :

- Des rendements très faibles par rapport aux potentiels permis par les conditions climatiques, sauf dans le cas des mil et sorgho de Koutiala.
- Une très forte variabilité locale (intra-villageoise).
- Une certaine complexité des situations agricoles au Mali du fait de la présence de plusieurs variétés dans les villages.

VII.2. Ce que nous enseignent les démarches adoptées pour l'adaptation du modèle

Il a été possible de paramétrer le modèle de façon satisfaisante sur la majorité des variétés paysannes et des essais étudiés, et ce en s'efforçant de ne jouer que sur un nombre très réduit de paramètres pour distinguer les variétés entre elles : principalement les sommes de degré-jour, les coefficients de sensibilité au photopériodisme, et les relations de répartition entre les biomasses aériennes feuilles et tiges. Le modèle rend en particulier très bien compte des phases et cycles de développement des variétés paysannes qui toutes présentent un certain degré de sensibilité au photopériodisme.

Certaines variétés ont cependant nécessité des paramétrages spécifiques. Cela peut découler d'erreurs et il sera nécessaire de revenir sur ces cas particuliers. Il faut souligner ici que pour de nombreuses variétés nous n'avons pu travailler que sur des jeux très réduits d'observations, ce car le projet ne permettait pas d'en obtenir plus.

La démarche simple de « passage au milieu paysan moyen » en jouant uniquement sur la réduction du coefficient de conversion de l'énergie lumineuse (ϵ_b) s'est avérée peu performante.

En effet, si elle permet toujours d'estimer correctement la valeur moyenne régionale des rendements, annuelle ou inter-annuelle, elle a pour conséquence de réduire très fortement la variabilité intra-régionale (entre sites) et/ou inter-annuelle. En effet, les valeurs moyennes de rendements étant faibles, il faut fortement réduire le coefficient ϵ_b (de 4,4 g/MJ à des valeurs de l'ordre de 3 g/MJ) et de ce fait on limite les gammes de variation des rendements simulés. Par ailleurs on a pu remarquer que les valeurs adéquates du ϵ_b ne sont pas les mêmes d'une année à l'autre et que l'usage d'une valeur unique de ce coefficient introduisait des erreurs systématiques sur certaines années, dans un sens ou dans l'autre (surestimation/ sous-estimation des rendements).

L'examen détaillée de chaque situation (plus développé dans le cadre du livrable D3.1.d) semble par ailleurs indiquer une incidence négative sur les rendements des années plutôt pluvieuses, en particulier lorsqu'il y a des périodes à très forte précipitation : c'est le cas pour les productions de mil de la zone de Niamey en 2006, 2007 et 2008, de Diourbel en 2007 et surtout 2008, et de Kaffrine en 2008. On observe la même chose pour le maïs au Sénégal pour 2007 et 2008. Sur le plan agronomique de tels constats n'ont rien d'étonnant, en particulier quand on sait que les cultures étudiées poussent sur des sols peu fertiles, avec aucun ou peu d'apports fertilisants, et avec des moyens de lutte contre les adventices très réduits.

De fait on peut suspecter plusieurs effets négatifs des périodes à forte pluviométrie, effets dont la plupart seront d'autant plus accentués que les conditions agronomiques seront peu favorables :

- des pertes des rares éléments fertilisants en surface par ruissellement, et au cours du cycle par entraînement en profondeur (lixiviation) ;
- des effets mécaniques négatifs sur les jeunes plantes lors des 3-4 premières semaines ;
- en conséquence de l'abaissement de la fertilité on peut craindre une plus forte agressivité du striga ;
- une plus grande pression des adventices si les conditions sont plus humides ;
- un taux de pollinisation plus faible, et donc une réduction du rendement, si de fortes pluies coïncident avec la floraison mâle car le mil est fortement allogame ;
- un développement accru de problèmes phytosanitaires pouvant affecter les grains (champignon, moisissures, insectes) si les conditions sont particulièrement humides au cours de la phase de remplissage ;
- un possible ralentissement des mécanismes physiologiques en cas d'engorgement du sol : que ce soit en phase de développement végétatif ou en phase de remplissage du grain (effets sur la photosynthèse et les réallocations) ; cela est particulièrement connu pour le maïs qui n'aime pas pousser dans des conditions trop humides ;
- en particulier un possible ralentissement du développement racinaire en profondeur qui peut avoir des conséquences néfastes sur le plan de l'alimentation hydrique de la culture : en effet un tel ralentissement s'il se produit lors de la première moitié du cycle aura pour conséquence que la quantité de sol explorée par le système racinaire sera réduite par rapport à ce qu'elle aurait pu être, et que la culture pourra plus facilement être soumise à une contrainte hydrique en phase de floraison et/ou remplissage des grains ;
- un accroissement des ruissellements qui peut lui aussi avoir postérieurement des impacts négatifs sur la consommation de la culture : en effet le ruissellement augmente fortement en cas de saturation des horizons supérieurs du sol, donc lors des périodes à forte pluviométrie, et il faut pouvoir utiliser les bons algorithmes pour rendre compte de ce phénomène dont la conséquence est que des quantités réduites d'eau s'infiltrent en réalité dans le sol ;
- enfin des conditions de températures et rayonnement réduits peuvent éventuellement avoir des conséquences négatives particulières sur le remplissage des grains.

On peut donc noter que de façon paradoxale il est possible que de très fortes pluies en première partie de cycle puissent entraîner plus tard dans le cycle des situations de contrainte hydrique.

Malheureusement nos observations ne nous permettent pas d'étudier chacune de ces hypothèses qui sont extraites de la littérature et font actuellement l'objet d'une recherche bibliographique dans le cadre de la préparation d'une thèse (PhD) au CERAAS.

Pour arriver à mieux simuler les rendements moyens paysans tels qu'ils sont à l'heure actuelle il nous semble qu'il faudra impérativement, d'une part mieux rendre compte des principaux effets négatifs des périodes à forte pluviométrie, d'autre part considérer globalement pour chaque région une valeur type du coefficient de conversion de l'énergie lumineuse (ϵ_b) légèrement inférieure ou égale à 4,4 g/MJ : sans doute dans la gamme 3,8 - 4,4 g/MJ, car des valeurs plus faibles auront pour effet de réduire trop fortement la gamme de réponse du modèle. Cette valeur aurait valeur d'indicateur du potentiel de production de la région. La gestion des effets négatifs des périodes à forte pluviométrie passera vraisemblablement par différentes voies, dont principalement :

- une meilleure simulation des ruissellements ;
- l'introduction de facteurs empiriques liés aux pluies gérant le développement végétatif et racinaire (une diminution du ϵ_b) puis le développement des grains (diminution du ϵ_b et/ou du rendement potentiel) (intégration des effets biotiques et abiotiques sur le développement des grains).

Au-delà de la recherche bibliographique cette démarche impliquera donc :

- de réexaminer attentivement toutes les situations agronomiques observées, pour identifier pour chacune les possibles contraintes et le degré d'incertitude sur les données ; en particulier il faudra tenir compte des meilleurs rendements observés au sein de chaque village (centiles 0,8 et 0,9) pour porter des diagnostics les plus pertinents possibles : de fait si ces meilleurs valeurs sont très réduites par rapport à la normale, et qu'il ne semble pas y avoir de stress hydrique, on peut suspecter a priori « un facteur général négatif » sur l'ensemble des productions, et cela permet aussi de quantifier approximativement le poids de ce facteur sur « les meilleures parcelles paysannes » ;
- de se pencher à nouveau sur les simulations de calibration, pour améliorer/simplifier les paramétrages et pour valider les algorithmes réduisant les rendements en cas de contrainte hydrique ;
- de rechercher des jeux de données complémentaires dans les autres jeux de données à disposition des équipes afin de pouvoir bien valider ces paramétrages ;
- de tester différentes hypothèses pour les ruissellements (et les caractéristiques des sols) ;
- de générer alors différents jeux de « yields-gap » (différences entre rendements simulés et observés : valeurs moyennes et centiles 0,8 et 0,9) en relation à ces hypothèses de ruissellements et à différentes hypothèses réalistes de ϵ_b (par exemple pour des ϵ_b de 4,4, 4 et 3,6 g/MJ) ;
- de confronter ces différentes valeurs de « yield-gap » aux cumuls des pluies durant les différentes phases des cycles, pour voir si des corrélations peuvent être mises en évidence ;
- d'en extraire si possible des facteurs empiriques de réduction du développement et du rendement ;
- de tester ces hypothèses.

Une thèse a été envisagée dans cette optique au CERAAS. Comme indiqué l'étudiant a commencé en effectuant une recherche bibliographique approfondie sur les contraintes de « trop d'eau » chez les céréales et autres cultures aussi. Il regardera également comment ces questions « de trop d'eau » sont traitées en modélisation.

Au-delà de l'amélioration du modèle la prévision agricole opérationnelle implique de pouvoir bien déterminer les situations agronomiques dominantes de chaque zone, c'est à dire la (ou les 2) variété(s) à considérer, et les démarrages des cycles de production.

Enfin il y a également la question de la détermination de la production globale d'une zone donnée : cette question implique d'intégrer les surfaces agricoles et de regarder s'il n'y a pas au niveau des terroirs des espaces qui produisent plus que d'autres.

Références bibliographiques

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

Alhassane, A. 2009. 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, RCI

Alhassane, A., S. B. Traoré, M. Zouzou, B. Sarr, M. Amadou. 2008. Effet de la fertilisation azotée et de la densité de semis sur la croissance et le développement d'une variété de mil au Sahel. *Agronomie Africaine* 20 (2) : 151 - 163

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.

Cisse, L., 1986. Etude des effets d'apports de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du Centre-Nord du Sénégal. Thesis. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 184 pp.

Cortier, B., G. Pochier, and J. Imbernon. 1988. Le maïs au Sénégal : effet des techniques culturales et des conditions hydriques en culture pluviale. *L'Agron. Trop.* 43:85-90.

Dancette, C. 1983. Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agronomie Tropicale* 38, 4. p.281-294

Dingkuhn M, Baron C, Bonnal V, Maraux F, Sarr B, Sultan B, Clopes A, Forest F, 2003. Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. In 'Decision Support Tools for Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa - A practical Guide'. (Eds Struif Bontkes TE, Wopereis MCS) pp. 127-139 (CTA Wageningen, The Netherlands

Dingkuhn, M., M. Kouressy, M. Vaksman, B. Clerget, and J. Chantereau. 2008. A model of sorghum photoperiodism using the concept of threshold-lowering during prolonged apertence. *Europ. J. Agronomy* 28:74-89

FAO, 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. ISBN 92-5-104219-5.

Hamon, G., 1980. Mise en oeuvre et critique des méthodes de caractérisation hydrodynamique de la zone non saturée du sol. Application aux sols de culture du Sénégal. Thèse de Doct. Ing. Inst. de Mécanique, Grenoble, 136 pp.

Hanway, 1989. How a corn plant develops. Special Report N° 48. Iowa State University of Science and Technology .

Imbernon, J., 1981. Variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol du Sénégal. Application au calcul d'un bilan sous culture. Thesis. Institut National Polytechnique, Grenoble, 152 pp.

Ndiaye, A. 1997. Effet de la température et de la photopériode sur le développement du maïs en zone sahélienne : modélisation de la durée semis – floraison. In : Strategy for sustainable

maize production in west and central Africa : Proceedings of a regional maize workshop. IITA, Cotonou, 21 – 25 avril : 182 – 193.

Niane Badiane A., Khouma M., Sène M., 2000. Dryland Research Working Paper 15 : RÉGION DE DIOURBEL : GESTION DES SOLS. Drylands Research, Crewkerne, GB. ISSN 1470-9384. 25 p.

Ong C.K. and Monteith J.L., 1985. Response to pearl millet to light and temperature. Field Crops Research 11, 141-160.

Samba A. 1998: Les logiciels Dhc de diagnostic hydrique des cultures. Prédiction des rendements du mil en zones soudano-sahéliennes de l’Afrique de l’Ouest. Sécheresse, 9 (4), 281-288.

Samba, A., B. Sarr, C. Baron, E. Gozé, F. Maraux, B. Clerget and M. Dingkuhn, 2001: La prédiction agricole à l’échelle du Sahel. In: Malézieux E., G. Trébuil and M. Jaeger (Eds.). Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision. Cirad and INRA, Montpellier, France, 243-262.

Sinclair T.R. and Muchow R.C., 1999. Radiation use efficiency. Adv. Agron. 65. 215-265.

Traoré S.B., Kouressy M., Muller B., Somé L., Alhassane A., Sultan B., Vintrou E., Sangaré S., Vaksman M., Diop M., Bégué A., Dingkhun M., Baron C. Characterizing and Modelling the Diversity of Cropping Situations under Climatic Constraints in West Africa. Submitted to Atmospheric Science Letters.

Van Oosterom E.J., O’Leary G.J., Carberry P.S., Craufurd P.Q., 2002. Simulating growth, development, and yield of tillering pearl millet. III. Biomass accumulation and partitioning. Field Crops Research 79, 85-106.

Annexes

ANNEXE 1 : Rangs et variabilités des rendements paysans mesurés

Rendements paysans en mil (kg/ha) pour la zone de Diourbel, Sénégal, 2006-2008

	DIOURB 06	DIOURB 06	DIOURB 06	DIOURB 06	DIOURB 06	DIOURB 06	DIOURB 06
	BAK06	DDG06	MBW06	TBS06	TKN06	DJL06	ZONE
	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL
moy	569	322	304	741	605	635	529
éct.	279	270	234	381	292	302	177
CV%	49%	84%	77%	52%	48%	48%	33%
max	1111	894	681	1920	1133	1159	1920
min	100	14	3	264	25	91	3
25%	375	88	42	477	402	464	308
50%	518	184	276	650	554	521	451
75%	770	563	551	960	823	921	765
80%	886	591	565	999	848	975	811
90%	919	698	594	1226	983	1065	914

	DIOURB 07	DIOURB 07	DIOURB 07	DIOURB 07	DIOURB 07	DIOURB 07
	BAK07	DDG07	MBW07	TBS07	TKN07	ZONE
	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL
moy	626	550	734	548	388	569
éct.	324	195	371	243	122	126
CV%	52%	35%	51%	44%	31%	22%
max	1459	1103	1393	991	681	1459
min	183	248	238	111	184	111
25%	384	400	405	373	311	375
50%	542	535	624	542	388	526
75%	786	661	1122	683	430	736
80%	823	704	1165	795	468	791
90%	1155	779	1276	903	577	938

	DIOURB 08	DIOURB 08	DIOURB 08	DIOURB 08	DIOURB 08	DIOURB 08
	BAK08	DDG08	MBW08	TBS08	TKN08	ZONE
	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL
moy	280	365	334	346	347	334
éct.	75	124	109	298	165	32
CV%	27%	34%	32%	86%	48%	10%
max	445	718	629	1524	992	1524
min	130	175	168	39	77	39
25%	233	283	258	173	252	240
50%	275	337	319	272	319	304
75%	327	438	410	383	393	390
80%	335	466	421	393	413	406
90%	368	538	480	596	528	502

Rendements paysans en mil (kg/ha) pour la zone de Kaffrine, Sénégal, 2007-2008

	KAFF 07	KAFF 07	KAFF 07	KAFF 07	KAFF 07	KAFF 07
	BOUL_07	DELB_07	MABO_07	NGAN_07	SAGN_07	ZONE
	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL
moy	649	336	744	970	441	628
éct.	371	148	335	487	213	251
CV%	57%	44%	45%	50%	48%	40%
max	1740	669	1747	2318	930	2318
min	243	86	309	390	93	86
25%	385	267	547	617	315	426
50%	499	318	634	794	397	528
75%	867	397	896	1151	501	762
80%	993	434	920	1179	592	824
90%	1053	529	1115	1505	790	999

	KAFF 08	KAFF 08	KAFF 08	KAFF 08	KAFF 08	KAFF 08
	BOUL_08	DELB_08	MABO_08	NGAN_08	SAGN_08	ZONE
	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL
moy	681	600	595	510	648	607
éct.	384	217	342	392	325	65
CV%	56%	36%	57%	77%	50%	11%
max	1840	1190	1708	1932	1578	1932
min	212	283	117	113	169	113
25%	371	444	351	237	410	362
50%	631	539	510	438	621	548
75%	899	754	725	659	746	757
80%	964	767	826	698	833	818
90%	1120	933	1031	941	1112	1027

Rendements paysans en maïs (kg/ha) pour la zone de Missirah/Tambacounda, Sénégal, 2006-2008

	TAMBA 06	TAMBA 06	TAMBA 06	TAMBA 06	TAMBA 06	TAMBA 06
	BIRA06	FOUG06	HAMD06	MADI06	SAR06	ZONE
	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS
moy	1675	1676	1442	2610	2058	1892
éct.	805	616	668	862	833	458
CV%	48%	37%	46%	33%	40%	24%
max	3237	2976	2710	4307	3421	4307
min	297	949	148	579	573	148
25%	1049	1099	1069	2238	1335	1358
50%	1562	1524	1418	2859	2113	1895
75%	2311	2138	1904	3090	2566	2402
80%	2431	2330	2015	3178	2942	2579
90%	2733	2572	2086	3376	3127	2779

	TAMBA 07	TAMBA 07	TAMBA 07	TAMBA 07	TAMBA 07	TAMBA 07
	BIRA07	FOUG07	HAMD07	MADI07	SAR07	ZONE
	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS
moy	1608	1283	1030	1423	1532	1375
éct.	802	595	640	880	698	229
CV%	50%	46%	62%	62%	46%	17%
max	3277	2781	2716	4006	2755	4006
min	405	524	115	79	51	51
25%	1090	782	485	779	1155	858
50%	1458	1211	1006	1344	1609	1326
75%	2157	1713	1455	1895	2065	1857
80%	2285	1800	1532	2080	2110	1962
90%	2846	2025	1763	2527	2397	2312

	TAMBA 08	TAMBA 08	TAMBA 08	TAMBA 08	TAMBA 08	TAMBA 08
	BIRA08	FOUG08	HAMD08	MEDI08	SAR08	ZONE
	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS
moy	1203	1274	922	1503	1355	1251
éct.	737	635	682	885	764	216
CV%	61%	50%	74%	59%	56%	17%
max	3406	3347	2831	3658	3117	3658
min	222	446	260	152	306	152
25%	676	771	416	843	766	695
50%	1061	1284	611	1397	1225	1116
75%	1457	1575	1336	2044	1887	1660
80%	1549	1720	1480	2158	1948	1771
90%	2078	2047	1875	2432	2337	2154

Rendements paysans en mil (kg/ha) pour la zone de Niamey, Niger, 2004-2008

	Niamey 04	Niamey 04	Niamey 04	Niamey 04	Niamey 04	Niamey 04	Niamey 04	Niamey 04	Niamey 04	Niamey 04	Niamey 04
	Alkama	Banizoumbou	Barkiawel	GardamaKouara	Karé	Koyria	Sadoré	Tanabéri	Torodi	Wankama	Zone
	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil
moy.	800	704	1200	848	1040	553	1068	1605	774	1042	963
éct.	249	208	281	222	339	168	242	365	210	362	299
CV%	31%	29%	23%	26%	33%	30%	23%	23%	27%	35%	31%
max	1650	1250	1800	1150	2100	850	1340	2250	1000	2000	2250
min	350	350	800	260	500	150	420	800	252	300	150
25%	650	550	950	543	900	350	825	1400	346	600	711
50%	750	650	1175	640	925	400	1100	1550	513	850	855
75%	825	760	1350	888	1100	575	1208	1850	605	1100	1026
80%	890	800	1410	904	1200	600	1212	1960	652	1100	1073
90%	1020	940	1605	950	1400	650	1300	2005	841	1300	1201

	Niamey 05	Niamey 05	Niamey 05	Niamey 05	Niamey 05	Niamey 05	Niamey 05	Niamey 05	Niamey 05	Niamey 05	Niamey 05
	Alkama	Banizoumbou	Barkiawel	GardamaKouara	Karé	Koyria	Sadoré	Tanabéri	Torodi	Wankama	Zone
	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil
moy.	904	510	1030	347	350			1215	940	307	700
éct.	352	171	176	104	122			144	304	56	361
CV%	39%	34%	17%	30%	35%			12%	32%	18%	52%
max	1490	715	1350	600	600			1400	1514	423	1514
min	110	156	700	200	100			800	195	195	100
25%	420	455	900	250	300			1138	281	260	500
50%	590	520	1000	300	350			1250	396	325	591
75%	770	650	1138	400	400			1325	551	325	695
80%	808	650	1200	400	440			1340	696	338	734
90%	1174	683	1300	500	500			1365	892	390	850

	Niamey 06	Niamey 06	Niamey 06	Niamey 06	Niamey 06	Niamey 06	Niamey 06	Niamey 06	Niamey 06	Niamey 06	Niamey 06
	Alkama	Banizoumbou	Barkiawel	GardamaKouara	Karé	Koyria	Sadoré	Tanabéri	Torodi	Wankama	Zone
	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil
moy.		508	530	606	459	690	737	899	384	997	646
éct.		150	146	257	155	191	135	250	160	435	205
CV%		30%	27%	42%	34%	28%	18%	28%	42%	44%	32%
max		688	750	989	842	1119	1020	1442	673	2284	2284
min		177	208	43	159	414	509	464	75	408	43
25%		337	350	286	267	524	623	749	184	680	444
50%		407	474	436	374	709	732	860	286	834	568
75%		584	585	538	443	813	793	1014	373	1108	694
80%		600	592	609	465	821	843	1089	398	1217	737
90%		643	690	670	531	902	926	1352	516	1493	858

	Niamey 07	Niamey 07	Niamey 07	Niamey 07	Niamey 07	Niamey 07	Niamey 07	Niamey 07	Niamey 07	Niamey 07	Niamey 07
	Alkama	Banizoumbou	Barkiawel	GardamaKouara	Karé	Koyria	Sadoré	Tanabéri	Torodi	Wankama	Zone
	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil
moy.		484	501	470	396	613	577	929	369	398	526
éct.		296	63	155	140	303	106	130	216	113	172
CV%		61%	13%	33%	35%	49%	18%	14%	59%	28%	33%
max		1596	608	759	637	1259	797	1274	1019	689	1596
min		152	350	152	142	216	293	646	87	150	87
25%		237	468	350	260	370	518	860	201	322	398
50%		384	513	451	312	429	571	905	336	374	475
75%		445	541	553	420	648	616	1005	463	450	571
80%		512	555	561	501	700	635	1020	493	451	603
90%		632	574	581	561	1166	704	1074	583	525	711

	Niamey 08	Niamey 08	Niamey 08	Niamey 08	Niamey 08	Niamey 08	Niamey 08	Niamey 08	Niamey 08	Niamey 08	Niamey 08
	Alkama	Banizoumbou	Barkiawel	GardamaKouara	Karé	Koyria	Sadoré	Tanabéri	Torodi	Wankama	Zone
	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil	Mil
moy.	539	497	515	636	485	401	842	794	519		581
éct.	223,2	156,0	110,7	232,6	117,6	233,8	297,2	131,2	187,9		148
CV%	41%	31%	22%	37%	24%	58%	35%	17%	36%		25%
max	926,7	794,7	891,3	1065,2	761,9	943,9	1227,0	976,4	905,7		1227
min	102,2	98,5	315,8	253,9	238,8	111,9	253,0	399,8	116,1		99
25%	307,5	249,5	376,5	422,1	383,2	205,2	476,5	725,8	314,3		385
50%	405,2	338,9	408,4	616,9	457,6	278,2	781,1	778,8	423,2		499
75%	608,1	453,5	458,5	798,7	519,4	418,4	1026,2	838,8	560,6		631
80%	621,1	482,0	477,3	805,4	547,2	435,0	1039,3	841,1	583,2		648
90%	768,7	541,1	512,9	949,8	608,7	631,9	1101,1	867,3	678,7		740

Rendements paysans en mil (kg/ha) pour les zones de Cinzana et Koutiala, Mali, 2007-2008

	Cinzana 07	Cinzana 07	Cinzana 07	Cinzana 07	Cinzana 07
	Bouawere	Fambougou	Farissouma	Ngakoro	Zone
	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL
moy.	2008	1584	1809	2273	1918
éct.	845	639	868	892	293
CV%	42%	40%	48%	39%	15%
max	4444	3389	4333	4476	4476
min	556	444	500	444	444
25%	1365	1139	1056	1667	1307
50%	2000	1556	1667	2167	1848
75%	2500	1972	2444	2833	2437
80%	2778	2133	2556	3111	2645
90%	3222	2355	2850	3444	2968

	Koutiala 07	Koutiala 07	Koutiala 07	Koutiala 07	Koutiala 07	Koutiala 07
	Finkoloni	Kapala	Nankorola	Sorobasso	Zandiela	Zone
	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL
moy.	1545	1689	1558	1614	1436	1568
éct.	653	665	851	587	887	93
CV%	42%	39%	55%	36%	62%	6%
max	3229	2917	4000	3333	4271	4271
min	417	417	444	402	417	402
25%	1000	1146	901	1237	732	1003
50%	1563	1863	1333	1444	1146	1470
75%	2083	2188	2135	2045	2019	2094
80%	2188	2222	2222	2161	2100	2179
90%	2333	2500	2637	2434	2792	2539

	Cinzana 08	Cinzana 08	Cinzana 08	Cinzana 08	Cinzana 08	Cinzana 08
	Berthela	Bouawere	Fambougou	Farissouma	Ngakoro	Zone
	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL
moy.	916	1130	1192	1128	1245	1122
éct.	360	476	333	818	535	125
CV%	39%	42%	28%	73%	43%	11%
max	1800	2600	1800	4240	2800	4240
min	360	320	600	240	400	240
25%	600	800	928	580	880	758
50%	920	1040	1200	840	1120	1024
75%	1160	1400	1400	1360	1600	1384
80%	1200	1600	1480	1536	1680	1499
90%	1400	1800	1600	2480	1960	1848

	Koutiala 08	Koutiala 08	Koutiala 08	Koutiala 08	Koutiala 08	Koutiala 08
	Finkoloni	Kapala	Nankorola	Sorobasso	Zandiela	Zone
	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL	MIL
moy.	2017	2062	1617	1641	1887	1845
éct.	814	654	640	993	759	207
CV%	40%	32%	40%	61%	40%	11%
max	4167	3646	3111	4444	3646	4444
min	469	1042	417	222	56	56
25%	1458	1563	1137	1111	1406	1335
50%	2083	2083	1667	1667	1889	1878
75%	2604	2604	1984	2222	2435	2370
80%	2604	2604	2083	2444	2510	2449
90%	3125	3030	2391	3333	2782	2932

Rendements paysans en sorgho (kg/ha) pour les zones de Cinzana et Koutiala, Mali, 2007-2008

	Cinzana 07	Cinzana 07	Cinzana 07	Cinzana 07	Cinzana 07
	Bouawere	Fambougou	Farissouma	Ngakoro	Zone
	SORGHO	SORGHO	SORGHO	SORGHO	SORGHO
moy.	1724	1133	1848	1503	1552
éct.	818	448	828	668	314
CV%	47%	40%	45%	44%	20%
max	4333	2444	4000	3667	4333
min	444	333	333	286	286
25%	1111	778	1222	1000	1028
50%	1667	1000	1667	1437	1443
75%	2111	1361	2319	1856	1912
80%	2133	1556	2444	2000	2033
90%	2800	1728	3017	2411	2489

	Koutiala 07	Koutiala 07	Koutiala 07	Koutiala 07	Koutiala 07	Koutiala 07
	Finkoloni	Kapala	Nankorola	Sorobasso	Zandiela	Zone
	SORGHO	SORGHO	SORGHO	SORGHO	SORGHO	SORGHO
moy.	1488	2076	1785	1422	1344	1623
éct.	943	989	977	1011	976	303
CV%	63%	48%	55%	71%	73%	19%
max	3690	3958	4167	4444	4444	4444
min	222	119	13	93	13	13
25%	702	1328	1111	694	556	878
50%	1222	2144	1667	1222	1190	1489
75%	2230	2850	2500	2083	1875	2308
80%	2476	3021	2672	2222	2000	2478
90%	3018	3426	3187	2777	2778	3037

	Cinzana 08	Cinzana 08	Cinzana 08	Cinzana 08	Cinzana 08	Cinzana 08
	Berthela	Bouawere	Fambougou	Farissouma	Ngakoro	Zone
	SORGHO	SORGHO	SORGHO	SORGHO	SORGHO	SORGHO
moy.	948	949	984	1137	990	1002
éct.	453	461	308	611	495	78
CV%	48%	49%	31%	54%	50%	8%
max	2440	2400	1900	2720	2280	2720
min	400	400	400	400	400	400
25%	570	570	800	720	610	654
50%	840	840	1000	880	900	892
75%	1190	1230	1200	1600	1120	1268
80%	1280	1280	1200	1680	1440	1376
90%	1556	1600	1400	2016	1800	1674

	Koutiala 08	Koutiala 08	Koutiala 08	Koutiala 08	Koutiala 08	Koutiala 08
	Finkoloni	Kapala	Nankorola	Sorobasso	Zandiela	Zone
	SORGHO	SORGHO	SORGHO	SORGHO	SORGHO	SORGHO
moy.	2225	2654	2378	1582	2185	2205
éct.	836	578	792	726	724	394
CV%	38%	22%	33%	46%	33%	18%
max	3500	3556	3571	3333	3542	3571
min	556	1333	469	556	625	469
25%	1667	2222	1864	1111	1780	1729
50%	2222	2778	2381	1667	2083	2226
75%	2834	3000	2988	2167	2813	2760
80%	3189	3200	3122	2222	2865	2920
90%	3333	3433	3354	2222	3229	3114

Rendements paysans en maïs (kg/ha) pour les zones de Cinzana et Koutiala, Mali, 2007-2008

	Koutiala 07	Koutiala 07	Koutiala 07	Koutiala 08	Koutiala 08	Koutiala 08	Koutiala 08
	Sorobaso	Zandiela	Zone	Finkoloni	Sorobasso	Zandiela	Zone
	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS	MAIS
moy.	2193	2058	2126	3196	2741	3066	3001
éct.	1118	1168	95	1150	1152	1183	235
CV%	51%	57%	4%	36%	42%	39%	8%
max	4487	4430	4487	4444	4444	4479	4479
min	208	222	208	833	556	781	556
25%	1307,5	1086,25	1197	2625,25	2166,5	2235,5	2342
50%	2083	2095,5	2089	3333	2778	3385	3165
75%	3016	2881	2949	4249,75	3889	4064,5	4068
80%	3333	3148	3241	4444	3889	4167	4167
90%	3690	3744,3	3717	4444	4421,8	4354	4407