

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
présenté pour l'obtention du Master
Agriculture, Agronomie et Agro-alimentaire

**Spécialisation « Systèmes et Techniques Innovants pour le Développement
Agricole Durable »**

Option « Semences et Plants Méditerranéens et Tropicaux »

**Utilisation du modèle SAMARA en appui à l'amélioration variétale
du riz pluvial**

par

Philippe ORIOL

Année de soutenance : 2010

**Organisme d'accueil : CIRAD - Unité de recherche « Adaptation agro-
écologique et Innovation variétale »**

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
présenté pour l'obtention du Master
Agriculture, Agronomie et Agro-alimentaire

**Spécialisation « Systèmes et Techniques Innovants pour le Développement
Agricole Durable »**
Option « Semences et Plants Méditerranéens et Tropicaux »

**Utilisation du modèle SAMARA en appui à l'amélioration variétale
du riz pluvial**

par

Philippe ORIOL

Mémoire préparé sous la direction de :
Michael DINGKUHN

**Organisme d'accueil : CIRAD - Unité de
recherche « Adaptation agro-écologique et
Innovation variétale »**

Présenté le : 23/09/2010

devant le Jury :

- Jean-Jacques KELNER
- Christian FOURNIER

Maître de Stage : Michael DINGKUHN

Tuteur enseignant : Benoît PALLAS

Abstract :

Faced with both the growing world rice consumption and the lack of irrigated agricultural land, rice production is more and more practiced as rainfed upland rice. This practice contributes to expand rice production on large available new areas where severe environmental constraints like drought can adversely affect yields. In order to develop high yielding and well adapted varieties to these environments, rice improvement programs can take benefits from the wide genetic diversity existing within *Oryza* genus. The extreme complexity of interaction phenomena between the expression of the genome and environments, and the great diversity of situations lead breeders to adopt an integrated approach involving plant modeling.

This study was aimed to calibrate and evaluate the model SAMARA for upland rice varieties, and then to use it in various situations. The model successfully simulates the growth of eight varieties representing different types of rice. The model explains over 80% of the variation of the duration of the crop cycle ($r^2 = 0.896$) and of the number of panicles ($r^2 = 0.828$), while biomass production ($r^2 = 0.714$) and grain yield ($r^2 = 0.551$) are slightly overestimated with a CVE respectively of 38% and 34%. The model reproduces the differences in yields between varieties and between sites, and shows highly significant G * E interaction for this trait. The yield's sensitivity to genotypic parameters and correlations between the output variables of the model are analyzed and discussed in order to consider their potential use in breeding programs. Provided that the domain of validity of the model has been previously defined, SAMARA can be considered as a powerful decision tool able to help breeders to improve the efficiency of their selection programs.

Keywords: *Oryza sativa*, rainfed rice, plant modeling, drought.

Résumé :

Confrontée à la fois aux besoins sans cesse croissants de l'alimentation mondiale et à des surfaces agricoles irrigables limitées, la production de riz fait de plus en plus appel à la riziculture pluviale. En effet, celle-ci se pratique dans des environnements très variés et contribue à étendre la production de riz à de vastes zones nouvelles. Mais l'extension de cette pratique se heurte à des contraintes environnementales de plus en plus fortes, dont l'une des plus importantes est le risque de sécheresse. Face à ce défi, la riziculture pluviale dispose de la large diversité génétique présente au sein des riz cultivés que les programmes d'amélioration peuvent valoriser pour développer des variétés performantes et adaptées aux environnements ciblés. L'extrême complexité des phénomènes d'interaction existant entre l'expression du génome et l'environnement, ainsi que la grande diversité des situations conduisent les améliorateurs à adopter une approche intégrée faisant appel, entre autres, à la modélisation de la croissance des plantes.

L'étude a consisté à calibrer le modèle SAMARA pour plusieurs variétés de riz pluvial, à l'évaluer puis à l'utiliser dans des situations diverses pour en connaître son domaine d'utilisation potentielle. Le modèle s'est montré performant pour simuler l'élaboration du rendement de huit variétés représentatives des différents types de riz cultivés. Le modèle explique plus de 80% de la variation concernant la durée des cycles ($r^2 = 0,896$) et le nombre de panicules produites ($r^2 = 0,828$), tandis que la production de biomasse aérienne ($r^2 = 0,714$) et le rendement en grains ($r^2 = 0,551$) sont légèrement surestimés avec un CVe respectivement de 38% et de 34%. Le modèle reproduit les différences de rendements entre les variétés et entre les sites, et met en évidence de façon hautement significative les interactions G*E sur ce critère. La sensibilité du rendement aux différents paramètres génotypiques intégrés dans le modèle, ainsi que les corrélations existant entre les différentes variables de sortie sont analysées et discutées pour en envisager leur utilisation éventuelle dans les programmes de sélection. Sous réserve d'avoir préalablement précisé son domaine de validité, le modèle SAMARA se montre un puissant outil d'aide à la décision à la disposition des améliorateurs pour appuyer leur travaux de sélection.

Mots-clés : *Oryza sativa*, riz pluvial, modélisation, stress hydrique

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mes collègues de ma nouvelle Unité de recherche « AIVA » qui m'ont accueilli dans leur équipe et soutenu chacun dans sa spécialité pour le bon déroulement de mon stage. Ces pensées vont particulièrement à Alain AUDEBERT pour la fourniture des données expérimentales et pour son appui en matière de physiologie du riz, à Gilles TROUCHE, à Marc CHATEL et à Nourollah AHMADI pour avoir partagé leurs expériences en sélection variétale du riz, à Jean-Christophe SOULIE et à Laurianne ROUAN pour leur disponibilité et leurs conseils en théorie de modélisation et statistiques appliquées aux modèles. Bien sûr, cette aventure n'aurait pas été possible sans l'engagement de Michael DINGKUHN qui j'espère a misé sur un bon cheval.

Je tiens à remercier ici tous les enseignants de SupAgro qui n'ont jamais ménagé leur force pour nous transmettre leurs savoirs. Je souhaiterais en retour montrer que leurs efforts n'auront pas été vains, y compris à l'égard d'un étudiant « atypique » issu de la formation continue. Par ailleurs, mon stage n'aurait jamais été aussi intense sans les stimuli de Benoît PALLAS, tuteur de mon stage, qui m'a encouragé aller toujours plus loin dans l'analyse des phénomènes étudiés. Je ne peux oublier Jean-Luc REGNARD qui m'a suivi dans ces études mais surtout, qui a été aussi l'un des initiateurs décisifs de ma participation à cette formation.

Comment ne pas mentionner ici Michel ARNAUD, responsable du service formation du CIRAD, ainsi que les responsables des services de gestion du personnel du CIRAD pour leurs appuis techniques et administratifs sans lesquels ma réorientation professionnelle n'aurait pas été envisageable.

Sans oublier ma famille qui a m'a supporté durant cette période estudiantine et qui a participé par sa compréhension à la réussite de mon projet.

SOMMAIRE

1. CONTEXTE DE L'ETUDE	1
1.1. Importance de la production et de la consommation mondiale de riz	1
1.2. Le riz pluvial : un agro système particulier	2
1.3. La physiologie et les phases de développement du riz	3
1.4. L'amélioration de la riziculture pluviale	5
1.5. La modélisation en appui à l'amélioration du riz pluvial	6
1.5.1. Principe de la modélisation	6
1.5.2. Approches utilisées pour modéliser l'élaboration du rendement	6
2. MATERIEL ET METHODE	7
2.1. Le modèle SAMARA	7
2.1.1. Description du modèle	7
2.1.2. Les principaux modules de SAMARA	8
2.2. Les données expérimentales utilisées	10
2.2.1. La station expérimentale de Sant-Rosa	10
2.2.2. Le matériel végétal	11
2.2.3. Les données expérimentales utilisées pour le calibrage du modèle	11
2.2.4. Les données expérimentales utilisées pour l'évaluation du modèle	12
2.2.5. Les sites retenus pour l'utilisation du modèle	12
3. RESULTATS	13
3.1. Calibrage du modèle	13
3.2. Evaluation du modèle	15
3.3. Simulations pour différents sites de culture	16
3.4. Analyse des corrélations entre les variables du modèle	18
3.5. Etude de sensibilité du modèle	18
3.6. Evolution des rendements simulés en fonction des paramètres génotypiques les plus influents	19
4. DISCUSSION	20
4.1. L'approche modélisation et domaine de validité du modèle	20
4.1.1. Calibrage et domaine de validité	20
4.1.2. Les limites du modèle SAMARA	21
4.2. Le modèle SAMARA : un outil pour l'amélioration du riz	22
4.2.1. Choix des critères de sélection	22
4.2.2. Caractérisation des environnements ciblés par les programmes de sélection variétale	22
4.2.3. Analyse des interactions G*E et définition d'idéotypes	23
5. CONCLUSION	24
Bibliographie	
Liste des illustrations	
Annexes	

Tableau 1 : Statistiques économiques mondiales du riz (Source FAOSTAT, 2008)

<i>Année 2006</i>	World	Asia	South America	Brazil	Colombia	N&C America	Africa	Côte d'Ivoire	Europe
Production (x1000T riz paddy)	644116	583873	22605	11527	2248	11203	22014	700	3428
Rendement (T/ha riz paddy)	4,12	4,19	4,50	3,88	6,28	6,09	2,32	1,89	5,80
Import (x1000T riz usiné)	27910	12132	995	642	197	2782	8176	903	3533
Export (x1000T riz usiné)	30537	22034	1983	290	0	3329	1183	0	1686
Consommation (x1000T usiné)	418271	371725	13418	7925	1591	8115	20470	1367	2939

1. CONTEXTE DE L'ETUDE

1.1. Importance de la production et de la consommation mondiale de riz

Le riz est l'une des céréales les plus cultivées dans le monde avec le blé et le maïs. Sa production annuelle, obtenue sur une surface cultivée de plus de 150 millions d'hectares, est estimée à plus de 600 millions de tonnes de riz paddy (Tableau 1). Le rendement moyen d'un peu plus de 4 tonnes de paddy par hectare cache une forte disparité des niveaux de productivité. Ceux-ci s'échelonnent de moins de deux tonnes par hectare dans certains pays d'Afrique où les contraintes environnementales sont fortes, à des moyennes de plus de 7 tonnes par hectare et par cycle de culture comme aux Etats-Unis où la maîtrise technique de la culture et les quantités d'intrants utilisées sont les plus importantes (Tableau 1).

La très grande majorité de cette production est obtenue en Asie qui en réalise plus de 90%. L'Inde, la Chine et Indonésie participent pour plus des 2/3 de cette production, mais ces pays en sont aussi les plus grands consommateurs.

La plus grande partie de la production de riz est autoconsommée (économie de subsistance) ou commercialisée dans le cadre de circuits courts locaux ou régionaux. A l'inverse, seulement 4 à 5% de la production mondiale, soit environ trente Millions de tonnes, sont introduits dans les circuits du commerce mondial. La Thaïlande, le Vietnam, les Etats-Unis et le Pakistan fournissent à eux seuls 70% du marché mondial, tandis que les régions importatrices à grande échelle sont l'Asie du Sud-est et du Moyen Orient, l'Afrique et dans une moindre mesure l'Amérique latine, l'Amérique du Nord et l'Europe (IRRI, site web).

La consommation moyenne de riz par habitant est en constante augmentation. Elle atteint actuellement un peu plus de 80 kg en moyenne par habitant et par an, avec une forte disparité selon les régions. Elle est la plus élevée en Asie où elle atteint une moyenne de 150 Kg par habitant et par an. L'engouement pour la consommation de riz en Afrique et en Amérique latine se traduit par une augmentation importante de la part du riz dans la ration alimentaire de ces pays en voie de développement avec une consommation variant de 30 à 60 Kg de riz par habitant et par an selon les régions. En Amérique du Nord et en Europe, elle augmente aussi légèrement, mais elle ne dépasse pas encore les 10 Kg par habitant et par an (UNCTAD, site web).

Le riz est ainsi à la base de l'alimentation d'une grande majorité de la population mondiale. Il assure environ la moitié des besoins en calories de la ration alimentaire en Asie, et environ un tiers des ces besoins pour les populations africaines et sud américaines (FAO, site web). Avec un accroissement de la population de 2% par an, le développement de la riziculture a un rôle important à jouer dans les objectifs de sécurité alimentaire de la population mondiale qui atteindra 9 Milliards

d'individus en 2030. Actuellement, la consommation mondiale augmente régulièrement d'environ 2 millions de tonnes par an (Trébuil et al, 2004).

La très grande concentration de la production et du potentiel d'exportation réalisés dans un faible nombre de régions constitue un risque important pour l'approvisionnement des populations. En effet, l'occurrence d'aléas climatiques (sécheresse, inondations) ou d'attaques parasitaires dans l'une ou l'autre de ces régions est susceptible de faire baisser sensiblement la disponibilité de cette denrée et de peser fortement sur les marchés provoquant ainsi des spéculations au détriment des populations les plus pauvres (Boris, J.P., 2010).

Il est donc indispensable de rechercher à stabiliser les niveaux de production par la diversification des sources d'approvisionnement. Les zones de deltas propices à la riziculture aquatique étant aujourd'hui saturées, on assiste actuellement à un développement non négligeable de la culture du riz pluvial qui permet d'ouvrir des surfaces nouvelles à la riziculture, bien que celles-ci soient souvent soumises aux aléas climatiques (sécheresse). De nombreux pays importateurs mentionnés ci-dessus, et en particulier en Afrique et en Amérique latine, sont concernés par cette dynamique (CIAT, 2002, AfricaRice, 2010).

1.2. Le riz pluvial : un agro-écosystème rizicole particulier

On peut distinguer quatre grands types d'agro-écosystèmes rizicoles en fonction de la situation hydrologique des cultures et des possibilités d'irrigation (Figure 1).

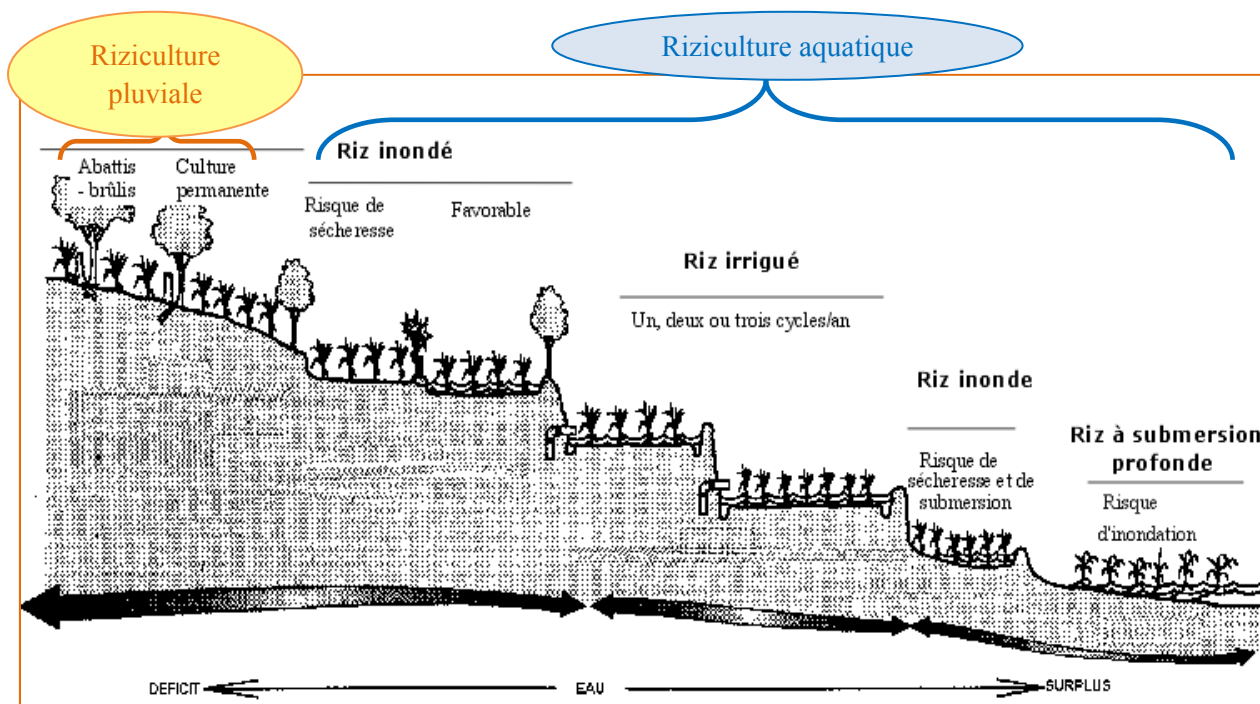


Figure 1 : les différents agro-écosystèmes rizicoles (Trébuil et al, 2004)

La riziculture aquatique, très majoritairement représentée avec plus de 88 % des surfaces rizicoles mondiales, regroupe les écosystèmes inondé, submergé et irrigué pour lesquels l'alimentation en eau est généralement non limitante pour la culture. La riziculture pluviale est pratiquée en région de plateaux (Upland) ou sur des pentes de collines (Hillside), où les pluies sont les seules ressources en eau disponible pour le développement de la plante (Jacquot, 1983).

La riziculture pluviale est nettement moins productive que la riziculture aquatique. Pratiquée sur environ 10 à 12% des surfaces rizicoles mondiales, elle ne contribue qu'à hauteur de 4% de la production mondiale de riz paddy (Trébuil, 2004). Les rendements moyens sont de l'ordre de 1 à 1,5 tonnes de paddy par hectare, avec de fortes variations selon les conditions environnementales et la technicité des agriculteurs. Cette riziculture est en effet pratiquée le plus souvent dans des conditions environnementales difficiles, et de plus, dans des régions peu peuplées et éloignées des grandes zones d'urbanisation où les pratiques culturelles sont peu intensifiées. Bien que les 2/3 des surfaces cultivées en riz pluvial soient situés en Asie (environ 10 Millions d'ha), les écosystèmes rizicoles pluviaux sont dominants en Afrique et en Amérique latine avec respectivement 1,8 millions et 3,1 millions d'hectares cultivés (Trébuil, 2004). C'est aussi pour ce type de riziculture que le potentiel de réserve de sol est le plus grand.

La culture du riz pluvial rencontre de nombreuses contraintes dont la plus importante est la dépendance vis-à-vis des conditions climatiques (pluviométrie). Le développement de variétés résistantes aux déficits hydriques et l'adoption de pratiques culturelles économes en eau sont souvent les facteurs les plus déterminants du niveau de productivité de cette culture. D'autre part, la riziculture pluviale est très souvent localisée sur des sols dégradés de plateaux ou de pentes soumis à l'érosion. Leur tendance à l'acidification est susceptible de provoquer des effets de toxicité aluminique, des carences en fer ou des difficultés d'assimilation du phosphore. A ces contraintes s'ajoute la difficulté de maîtriser les mauvaises herbes dans cet écosystème qui ne peut bénéficier de la submersion, et qui nécessite donc l'intervention d'une main d'œuvre nombreuse de moins en moins disponible (Séguy L., 1997, Charpentier H., 2006, Vales M., 2009).

Néanmoins, le développement de la riziculture pluviale constitue un défi majeur non seulement pour la sécurité alimentaire des populations les plus déshéritées, mais aussi pour assurer un approvisionnement en riz de vastes régions actuellement fortement dépendantes des importations.

1.3. La physiologie et les phases de développement du riz

La durée du cycle de croissance du riz varie de 80 à 280 jours, mais la majorité des variétés cultivées ont des cycles de culture compris entre 105 et 145 jours (Moldenhauer et al, 2003). Ce cycle est divisé en quatre phases à partir de la germination jusqu'à la maturité du grain. Après la levée, la phase végétative (BVP) correspond à la production des tiges et des feuilles. La vitesse de

croissance, déterminée par le plastochrone (durée d'apparition d'un nouveau primordium foliaire sur la tige), est synchrone avec le phyllochrone (apparition d'une nouvelle feuille sur la tige), ce qui permet de mesurer facilement la vitesse de croissance de la plante (Nemoto et al, 1995). Les nouvelles talles apparaissent sur les entrenœuds non encore développés lorsqu'un nombre minimum de feuilles est apparu sur la tige (Haun index). C'est aussi durant cette phase que le système racinaire s'établit dans le sol.

La phase reproductive (RPR) qui débute avec l'initiation paniculaire (IP) jusqu'à la floraison, s'accompagne de changements des caractéristiques de la croissance végétative. Les 4 ou 5 derniers entrenœuds s'allongent pour déterminer la hauteur de la tige, le dernier entrenœud étant celui qui atteint la plus grande longueur. L'architecture des feuilles durant la phase végétative influe fortement sur l'optimisation des rendements (Tanaka, 1965). Selon les conditions de culture, des feuilles larges et retombantes permettront une meilleure croissance et une compétition contre les mauvaises herbes, tandis que des feuilles érigées optimiseront la réception des rayonnements lumineux (Jennings, 1964).

Le délai entre le tallage maximum et l'initiation paniculaire dépend du niveau de précocité des génotypes. Ce délai peut être nul pour les variétés très précoces qui ont une phase végétative très courte. Le maximum du tallage coïncide alors avec le début de la phase reproductive (Tanaka, 1965).

La floraison, correspondant à l'apparition de l'épi au sommet de la tige, peut durer environ 5 jours. L'ouverture des anthères se produit pendant la période la plus chaude de la journée (entre 9 et 14 heures). De trop faibles ou trop fortes températures peuvent inhiber la fécondation (Vergara et al, 1970). La fécondation se fait très rapidement après émission des grains de pollen. Ceux-ci dont la viabilité est très courte (10 mn), tombent sur le stigmate dont le développement est synchrone, conduisant au caractère fortement autogame du riz.

C'est durant la phase de reproduction que se détermine le nombre de panicules par hectare (NPan) qui, multiplié par le nombre de plants par hectare (NP), constitue la première composante du rendement. On observe souvent un équilibrage entre le nombre de talles et la taille des panicules, un faible tallage étant associé à de grandes panicules et vice et versa (Wells et al, 1978).

La phase de maturation (MATU) intervient trois semaines après la fécondation et dure entre 25 et 50 jours selon la taille des grains et les conditions de température atmosphérique (Jennings, 1979). La plupart des variétés cultivées murissent entre 30 et 35 jours dans les conditions intertropicales de basse altitude (Dingkuhn, communication personnelle). Durant cette phase, les grains passent par les étapes laiteuse et pâteuse (MATU1), puis d'assèchement (MATU2). C'est durant la phase

de maturation que se constitue le poids des grains (PG) qui est une autre composante du rendement prise en compte dans la formule ci-dessous :

$$\text{Rendement} = NP * NPAN * NG * PG$$

où :

Rendement : Poids de grains par hectare (Kg/ha)

NP = Nombre de plants/ha

NPAN = Nombre de panicules par plant

NG= Nombre de grains par panicule

PG = Poids moyen d'un grain (en Kg)

Une meilleure compréhension de processus physiologiques intervenant à chacune de ces phases peut conduire à développer des variétés de riz plus productives, de grains de qualité améliorée, et présentant une plus grande résistance aux stress biotiques et abiotiques (Counce et al, 2003).

1.4. L'amélioration de la riziculture pluviale

Les travaux d'amélioration conduits depuis plusieurs décennies (révolution verte) ont permis de développer des variétés de à rendements élevés type « New Plant Type » en sélectionnant sur des critères morphologiques tels que la réduction de la hauteur des plants, un tallage modéré pour éviter un développement végétatif non utile, des feuilles courtes et érigées, des panicules compactes et une maturation précoce (IRRI, site web). Associés à des conditions de culture intensives, ces travaux ont conduit au doublement des rendements (Khush, 1997).

Pour ce faire, les améliorateurs disposent de la très vaste diversité génétique existant au sein du genre *Oryza.*, représenté majoritairement par l'espèce *O. sativa* originaire d'Asie et *O. glaberrima* originaire d'Afrique. On estime qu'environ 100.000 variétés sont cultivées ou conservées dans le monde, traduisant la très forte diversité morphogénétique disponible (Jacquot M., 1997). Les programmes d'amélioration actuellement de plus en plus ciblés sur les différents types de riziculture, dont la riziculture pluviale, favorisent le maintien de cette diversité dans leur sélection et les adaptations à des environnements variés (Guimaraes E.P., 2005, CIAT, site web).

Parallèlement, la grande diversité des environnements concernés par le développement du riz pluvial a conduit les améliorateurs à chercher à mieux comprendre les phénomènes d'interaction génotypes- environnements (G*E). Cela nécessite de bien connaître les environnements concernés par les programmes de sélection (Target Population of Environments) et de mieux comprendre les mécanismes d'adaptation variétale (Chapmann S., 2003, Heinemann A.B., 2007).

Une approche expérimentale simple est généralement peu adéquate et trop demandeuse en expérimentations pour prendre en compte toutes les interactions intervenant dans l'élaboration du rendement entre les génotypes et leurs environnements. Les processus d'amélioration du riz nécessite d'adopter une approche intégrée faisant appel aux technologies les plus avancées telles que les marqueurs moléculaires, la statistique, la bioinformatique, ainsi que la physiologie et la modélisation des plantes (Greame, 2009).

1.5. La modélisation en appui à l'amélioration du riz pluvial

1.5.1. Principe de la modélisation

Un modèle est une représentation simplifiée, et donc partielle, du fonctionnement d'un système que l'on souhaite étudier. La complexité du système dépendra de ses objectifs mais on recherchera toujours le meilleur équilibre entre simplicité et besoin de l'étude sans viser une exhaustivité inutile (Zeigler B.P., 1976).

La modélisation de la croissance d'un couvert végétal consiste à traduire par un jeu d'équations le fonctionnement de la plante en fonction des conditions environnementales. La variabilité du comportement de chaque génotype est prise en compte au travers des valeurs des paramètres de ces équations. La construction et la calibration du modèle est un processus qui demande plusieurs étapes de validation avant d'utiliser les sorties du modèles dans des environnements variés. Le modèle devient alors un outil puissant de simulation permettant d'identifier les paramètres les plus impliqués dans la variabilité des sorties du modèle (étude de sensibilité). Si ces paramètres sont liés à des phénomènes physiologiques de la plante, ils pourront être utilisés dans les processus de sélection variétale.

1.5.2. Approches utilisées pour modéliser l'élaboration du rendement

1.5.2.1. L'approche énergétique de la production de biomasse de Monteith

Cette approche permet de simuler la production à partir de la quantité d'énergie solaire disponible (PAR), de la capacité de la plante à capter (ϵ_a) et à transformer (ϵ_b) cette énergie en biomasse, puis d'allouer (IR) cette biomasse à la production (Monteith et al, 1977), à partir de l'équation suivante :

$$\text{Rendement} = IR * \sum_{\text{levée}}^{\text{récolte}} \epsilon_b * \epsilon_a * PAR_i$$

Dans ce type de modèle, l'efficacité d'absorption ϵ_a , l'efficacité biologique ϵ_b et l'indice de récolte IR évoluent en fonction des contraintes environnementales. Par exemple, un déficit hydrique se traduira par une baisse de l'efficacité d'absorption liée à une diminution de la croissance du

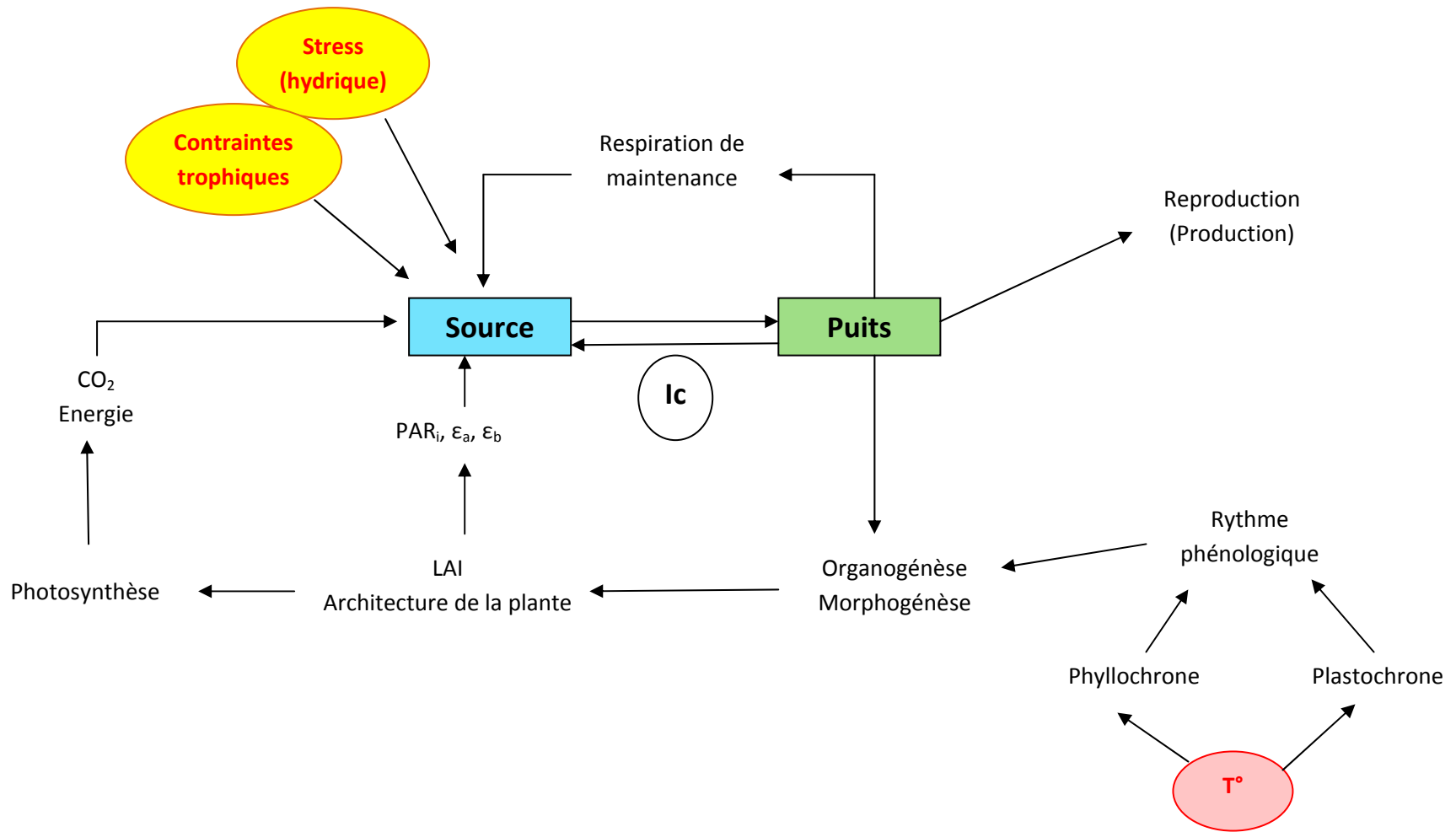


Figure 2 : Fonctionnement d'une plante selon le modèle SAMARA

système foliaire, ainsi que par une baisse de l'efficacité biologique liée à une diminution de l'activité photosynthétique.

1.5.2.2. Les approches simulant la croissance de la plante et les flux d'assimilats intégrant l'indice de compétition (I_c) entre sources et puits

Le développement de la plante est simulé à partir de règles de fonctionnement des méristèmes qui initient et pré-dimensionnent des organes (puits) en fonction des ressources disponibles (sources). Le statut de la plante est exprimé par l'Index Interne de Compétition (I_c) qui est une variable d'état correspondant au rapport entre la production d'assimilats (apports) et la somme des puits (demande) générés par la croissance de la plante (Luquet et al, 2006). L'indice interne de compétition permet en fait de fusionner les effets des différentes contraintes environnementales autrement que par un effet additif, et d'en tenir compte à l'échelle des organes pour simuler le fonctionnement structural et architectural de la plante (Figure 2).

Dans ce type de modèle, on considère que la plante ajuste son développement aux disponibilités en ressources. Pour cela, le modèle génère une valeur de l'indice de compétition (I_c) qui permet de reconstruire la dynamique d'absorption ϵ_a et d'assimilation ϵ_b de la plante et d'en tenir compte dans l'élaboration du rendement et de déterminer ainsi l'indice de récolte (IR).

L'objectif de cette étude est de tester un nouveau modèle de simulation de la croissance du riz, le modèle SAMARA, qui a la particularité d'intégrer dans son fonctionnement les deux approches décrites ci-dessus. Cela consistera à calibrer ce modèle pour une gamme de variétés de riz pluvial la plus large possible, à l'évaluer sur des données expérimentales observées, puis à le tester en différentes conditions représentatives des environnements concernés par la riziculture pluviale. En définitive, il conviendra d'envisager les possibilités d'utilisation de ce modèle pour l'amélioration du riz pluvial et d'en déterminer ses limites.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1. Le modèle SAMARA

2.1.1. Description du modèle

Le modèle SAMARA combine un modèle de type mécaniste, *EcoMeristem*, simulant le développement architectural de la plante à l'aide de l'indice interne de compétition I_c , à un modèle agronomique, SARRA-H, fonctionnant à l'échelle de la parcelle culturale (ECOTROP, site web).

Son objectif est de simuler la croissance de monocotylédones de type céréale tropicale, et concerne actuellement le riz et le sorgho.

Le modèle simule à un pas de temps journalier le développement de la plante, sa production de biomasse et son allocation entre organes végétatifs et reproductifs. La plante ajuste sa croissance aux ressources disponibles en générant une estimation de l'indice de compétition I_c , variable d'état intervenant dans l'organogénèse (en particulier le tallage) et la morphogénèse de la plante. Le fonctionnement du modèle est en fait basé sur le principe d'une réduction de la croissance due aux contraintes environnementales, combinée à une croissance potentielle de la culture calculée sur la base du rayonnement global et de son interception par le couvert foliaire. Il met particulièrement l'accent sur les contraintes hydriques grâce au module de simulation du bilan hydrique contenu dans SARRA-H (Dingkhun, 2005). Par contre, il n'est pas encore extrapolable aux situations où le rendement est limité par d'autres contraintes agronomiques (ressources minérales, attaques parasitaires ...)

2.1.2. Les principaux modules de SAMARA

Nous reprenons ici les modules qui concernent plus particulièrement notre étude ciblée sur la variabilité phénotypique des variétés de riz pluvial. Les paramètres cultureux et les variables de sortie du modèle sont décrits en annexes 1 et 2.

2.1.2.1. *Calcul de la consommation en eau et bilan hydrique*

La demande climatique est déterminée en fonction du lieu géographique et des variables climatiques (Température, rayonnement global ou durée d'insolation, humidité de l'air, vitesse du vent) selon la méthode de calcul de l'ETP Penmann. La consommation hydrique est calculée selon l'approche FAO 56 qui sépare l'évaporation du sol de la transpiration de la plante.

Le calcul du bilan hydrique est issu du modèle SARRA-H (Baron, 2003) dans lequel les flux d'eau évoluent au sein de trois réservoirs, l'un permettant d'évaluer l'évaporation en surface, le deuxième permettant de suivre l'évolution du front d'humectation, et le troisième contenant les racines permet d'évaluer l'offre en eau disponible pour le processus de transpiration.

La transpiration réelle est obtenue en appliquant à la transpiration potentielle un coefficient de stress hydrique (C_{str}) calculé en fonction de la FTSW et d'un coefficient de bornage ($pFact$) délimitant la portion de la FTSW au dessous de laquelle le stress hydrique commence à influencer sur la transpiration (Figure 3).

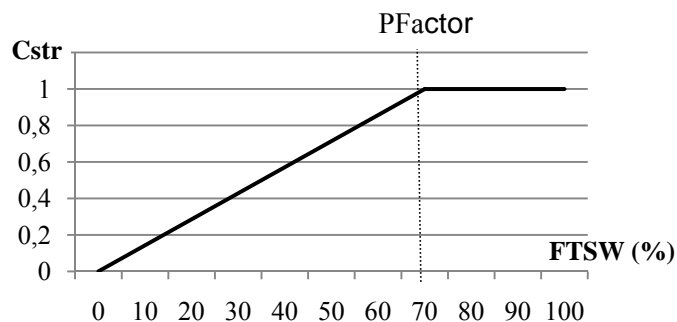


Figure 3 : Courbe d'évolution du coefficient de stress (Cstr) en fonction de la valeur de la fraction d'eau transpirable dans le sol (FTSW)

2.1.2.2. Le module de calcul de la phénologie

La durée des phases du cycle de culture est déterminée sur la base du calcul du temps thermique $SDJ = \sum\{(Tmin + Tmax)/2 - Tbase\}$, avec $Tbase = 11^{\circ}C$.

Le modèle divise le cycle de la plante en 6 phases depuis le semis (Levee), la phase végétative (BVP), la phase photopériodique (PSP), la phase reproductive (RPR), la phase de remplissage du grain (MATU1) jusqu'à la phase de dessiccation (MATU2). Pour les variétés non photopériodiques comme dans le cas de la majorité des riz cultivés, la phase PSP ne dure qu'un seul jour. Par ailleurs, le niveau de précocité est essentiellement déterminé par le paramétrage de $SDJBVP$.

2.1.2.3. Estimation du bilan carboné

Le modèle calcule l'énergie interceptée à l'aide de l'indice de surface foliaire (LAI) et de la surface spécifique foliaire (SLA), en utilisant la loi de Beer :

$$\epsilon_a = 1 - \exp(-k \cdot LAI)$$

Le taux de conversion ϵ_b ($TxConversion$) est considéré comme un caractère d'espèce et fixé à 4 g/MJ PAR pour le riz. La production nette de biomasse est la différence entre les quantités de biomasse assimilée ($Assim$) et utilisée pour la maintenance des organes ($Respmaint$). Le coefficient de stress $Cstr$ intervient dans le calcul de l'assimilation diminuant ainsi la production de biomasse en situation de stress hydrique. Tous les paramètres de ce module ont été fixés pour le riz lors de la conception du modèle.

2.1.2.4. Simulation de l'organo-morphogénèse

La mise en place du système foliaire est simulée au travers de l'élaboration des tiges et des caractéristiques foliaires. L'ajustement du tallage a été réalisé grâce au calibrage des paramètres *TilAbility*, *CoeffTillerDeath* et *HaunCritTillering* qui fixent respectivement la capacité variétale au tallage, le taux d'avortement des talles et le nombre de feuilles sur la tige au dessus duquel une nouvelle talle peut apparaître. L'indice de compétition I_c intervient fortement les deux premiers processus.

Le phyllochrone (*Phyllo*) détermine le nombre de feuilles potentielles pouvant apparaître sur la tige principale. La dimension des feuilles est calibrée grâce aux paramètres *LeafLengthMax* et *CoeffLeafWLRatio* qui fixent une longueur et une largeur maximale du limbe, tandis que la sénescence des feuilles est aussi prise en compte au travers du paramètre *CoeffLeafDeath*.

La mise en place du système racinaire dans le sol est approché à l'aide de paramètres déterminant la vitesse de croissance des racines pour chaque phases (*VRacBVP*, *VracRPR*, *Vrac Matu*), et d'un paramètre fixant la densité maximale de racines pouvant être atteinte dans le sol (*CoeffRootMassPerVolMax*).

L'allocation de la biomasse aux différents organes est calculée grâce à des relations d'allométrie entre les organes. Il est ainsi possible d'obtenir un indice de récolte IR en fonction de différents paramètres dont les plus sensibles sont la masse structurale des entrenœuds (*CoeffInternodeMass*) et le taux de croissance structurale des panicules (*CoeffpaniculeMass*).

Les paramètres de stérilité due au froid ($K_{CritCold}$), à la chaleur ($K_{CritHeat}$), ou au déficit hydrique ($K_{CritFtsw}$) n'ont pas fait l'objet de calibration en raison des conditions de réalisation de l'essai pour lesquelles aucun seuil de stérilité n'a été atteint. En ce qui concerne la stérilité due au stress hydrique, nous avons maintenu les valeurs seuils de 0,5 pour $K_{CritFtsw1}$ et 0,2 pour $K_{CritFtsw2}$.

2.2. Les données expérimentales utilisées

2.2.1. La station expérimentale de Santa-Rosa (Colombie)

Les données expérimentales utilisées pour le calibrage et la validation du modèle ont été obtenues sur des essais réalisés sur la station expérimentale du CIAT à Santa-Rosa. Cette station est située au pied de la cordillère orientale en amont du bassin amazonien de l'Orénoque dans le Département de Méta en Colombie (4° 5' de latitude nord, 73°5' de longitude ouest), à une altitude peu élevée de

Tableau 2 : Description des variétés de riz utilisées pour le calibrage du modèle SAMARA

Variétés	TYPES	ORIGINE / CREATION	PARTICULARITES
CICA 8	<i>Indica</i>	IRRI (Philippines)	Ancienne variété issue de la révolution verte, tardive à tiges courtes et à fort tallage, adaptée à la culture irriguée mais culture pluviale possible
FEDEARROZ 50	<i>Indica</i> moderne	FEDEARROZ (Colombie)	Variété de précocité moyenne, à tiges assez courtes et à tallage moyen, très largement cultivée en Colombie en culture irriguée, mais aussi en pluvial, particulièrement intéressante pour sa résistance à la Pyriculariose (<i>Magnaporthe grisea</i>).
ESPERANZA	<i>Japonica</i> amélioré	CIAT-CIRAD (Bolivie)	Variété de cycle moyen, présentant des tiges assez hautes et un tallage modeste. Issue du programme de sélection récurrente pour la culture pluviale
ORIZICA SABANA 6	<i>Japonica</i> améliorée	CIAT (Colombie)	Variété de précocité moyenne, de tige de hauteur moyenne et de tallage modeste. Elle a été sélectionnée pour sa bonne adaptation à la culture pluviale et aux sols acides
WAB77597-2-2-HB-2(127) (WAB77597)	<i>NERICA</i>	ADRAO (Afrique)	Variété de précocité moyenne, à tige haute et à tallage plutôt faible. Sélectionnée dans les conditions de savane africaine
CIRAD 409	<i>Japonica</i> améliorée	CIRAD – CIAT (Colombie)	Variété très précoce, de hauteur moyenne et de tallage modeste. Nouvelle variété sélectionnée pour la culture pluviale.
PCT-4\SA\1\1>975-M2-M3 (PCT-4-975)	<i>Japonica</i> améliorée	CIAT (Colombie)	Variété très précoce, de tiges assez hautes et de tallage modéré. Issue du programme de sélection récurrente du CIAT
SAQUAREMA	<i>Japonica</i> traditionnelle	Land race (Brésil)	Variété plutôt tardive, à tallage faible, mais considérée comme très rustique et résistante à la sécheresse.

330 m. Cette région fait partie de la zone des Llanos caractéristiques des grandes plaines herbeuses d'Amérique du sud.

La pluviométrie y est abondante avec une moyenne annuelle de 3500 mm répartie principalement de mars à novembre (Figure 4a). La culture du riz y est pratiquée durant la saison des pluies, mais la petite saison sèche de décembre à février a pu être mise à profit pour étudier les effets de déficits hydriques sur la physiologie du riz dans cette zone.

Le sol alluvionnaire est composé d'éléments grossiers en surface et d'un horizon profond sableux et très filtrant.

2.2.2. *Le matériel végétal*

Les données utilisées proviennent d'observations réalisées sur huit variétés de riz choisies pour leurs comportements et leurs origines variées (Tableau 2).

Le type *indica* est représenté par deux variétés largement cultivées en Amérique latine (CICA 8 et FEDEARROZ 50), la première étant issue des travaux de l'IRRI aux Philippines datant de la révolution verte, et l'autre obtenue par la Fédération des producteurs de riz en Colombie. Ce sont des variétés tardives, de tiges courtes et de tallage abondant.

Cinq variétés sont de type *japonica* dont l'une, SAQUAREMA est une variété traditionnelle (land race) adaptée aux conditions culturales brésiliennes. Elle est de hauteur moyenne et de tallage faible. Les caractéristiques du type *japonica* se retrouvent dans le feuillage constitué de limbes longs et assez larges. Elle a été choisie pour sa rusticité et sa tolérance à la sécheresse. Les quatre autres variétés sont des *japonica* améliorés récents (ESPERANZA, ORIZICA SABANA 6, CIRAD 409 et PCT-4-975) sélectionnés pour leur adaptation à la culture pluviale. Ce sont des variétés précoces à très précoces, de hauteur moyenne et de tallage modeste. Elles peuvent être très performantes malgré une durée de cycle particulièrement courte.

La variété WAB77597 est de type NERICA sélectionnée pour les écosystèmes pluviaux de savane africaine. C'est une variété de tiges hautes, à tallage modéré et de cycle moyen (120 jours).

2.2.3. *Les données expérimentales utilisées pour le calibrage du modèle*

Les données proviennent d'une expérimentation mise place en 2006 dans le cadre d'un projet collaboratif CIRAD-CIAT pour l'étude de la tolérance à la sécheresse du riz pluvial (Audebert, communication personnelle). Le dispositif expérimental était constitué d'un essai en blocs randomisés à quatre répétitions, avec des parcelles élémentaires de 15 m². L'essai a été semé en poquet de 20 x20 cm en début de saison des pluies (le 21/04/2006). Un démariage a été pratiqué dès que possible de façon à ce que les poquets ne soient composés que d'un seul et unique plant de

riz. Quatre séries de mesures ont été réalisées durant le cycle de culture à 45, 75 et 95 jours après semis ainsi qu'à la récolte (Annexe 3).

Durant cette expérimentation, aucun déficit hydrique n'est intervenu tout au long du cycle de développement de la culture. Ainsi, le calibrage du modèle a été réalisé essentiellement dans des conditions de croissance non limitée par la disponibilité en eau.

2.2.4. Les données expérimentales utilisées pour l'évaluation du modèle

L'évaluation du modèle a été réalisée en incluant aux données précédentes les données obtenues grâce à des expérimentations conduites à Santa-Rosa durant les contre-saisons¹ 2007-2008 et 2008-2009 (annexe 3). Ces expérimentations incluaient deux types d'alimentation hydrique dont un traitement bien alimenté en eau (NS = Non Stressé) et un traitement non irrigué subissant un stress hydrique (SS = Sous Stress) durant les phases reproductive et de maturation.

Les essais ont été semés les 09/10/2007 et 12/11/2008, c'est-à-dire dans la deuxième moitié de la saison des pluies assurant ainsi une alimentation hydrique suffisante en période végétative. Dans le premier essai, les variétés ESPERANZA, FEDEARROZ50 et SAQUAREMA, considérées comme témoins sont répétées 4 fois, alors que les variétés CIRAD409, CICA8 et ORIZICA SABANA6 ne disposent que d'un seul jeu de données. Par contre, une seule variété commune aux autres essais (ORIZICA SABANA 6) n'est présente dans l'expérimentation 2008-2009.

Les observations ont été faites à deux dates dont l'une avant le stress hydrique (60 j) et l'autre durant la période de stress à 75 jours après semis, ainsi qu'à la récolte. Les mesures ont été réalisées sur les mêmes caractères qu'en 2006 et selon des procédures équivalentes. La validité du modèle a été évaluée par le calcul du biais qui permet de repérer les erreurs systématiques du modèle, de la racine des carrés des écarts moyens (RMSE) et de sa valeur relative le RRMSE ou CVe (Wallach D., 2006).

2.2.5. Les sites retenus pour l'utilisation du modèle

2.2.5.1. La station centrale du CIAT à Palmira (Colombie)

Cette station, située dans le Département de la Vallée de la Cauca, est la plus proche de l'équateur (3° 30' de latitude nord, 76° 21' de longitude ouest) et à une altitude élevée de 966 m. La pluviométrie y est moins abondante, avec une moyenne annuelle d'environ 800 mm répartie en deux saisons pluvieuses, de mars à juin et de septembre à décembre (Figure 4b).

¹ Période comprise entre deux saisons des pluies

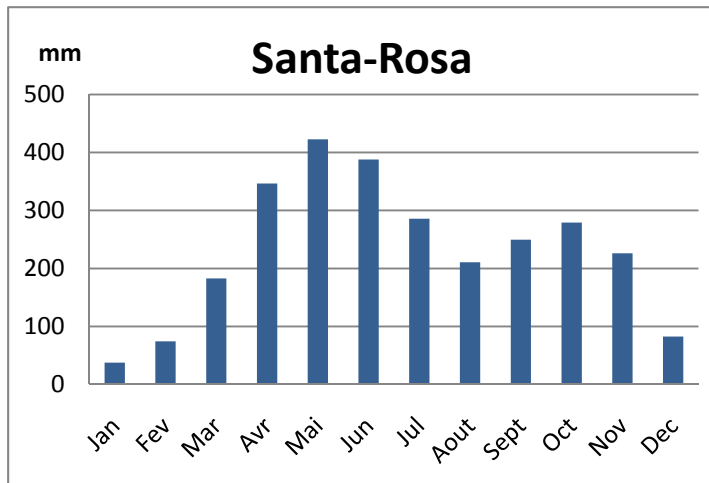


Figure 4a: Moyennes pluviométriques mensuelles à Santa-Rosa

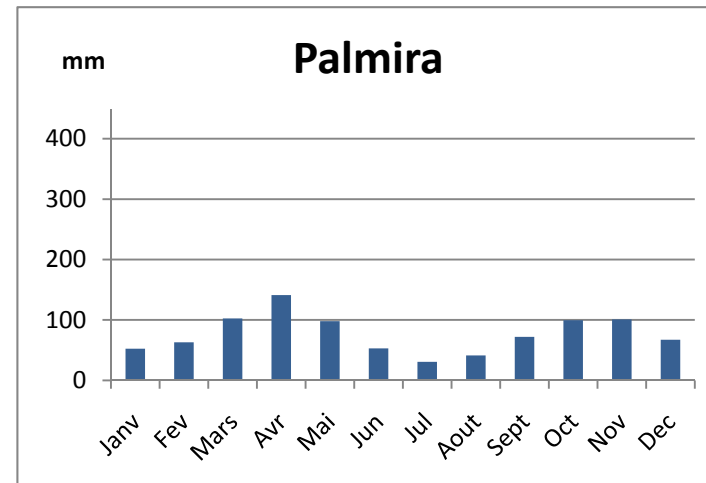


Figure 4b: Moyennes pluviométriques mensuelles à Palmira

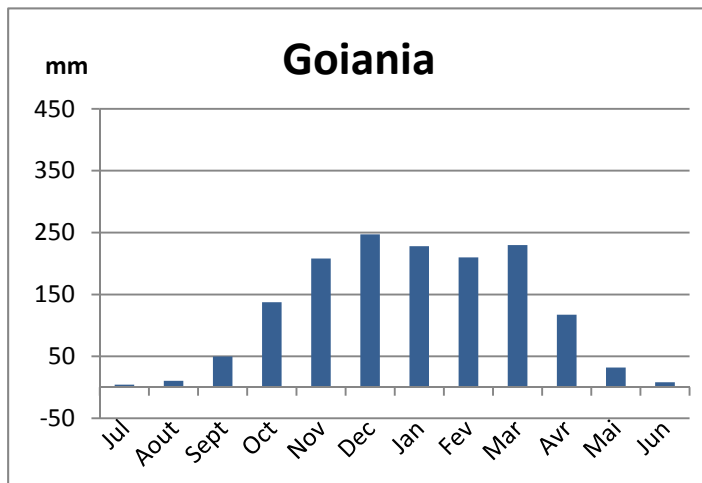


Figure 4c: Moyennes pluviométriques mensuelles à Goiania

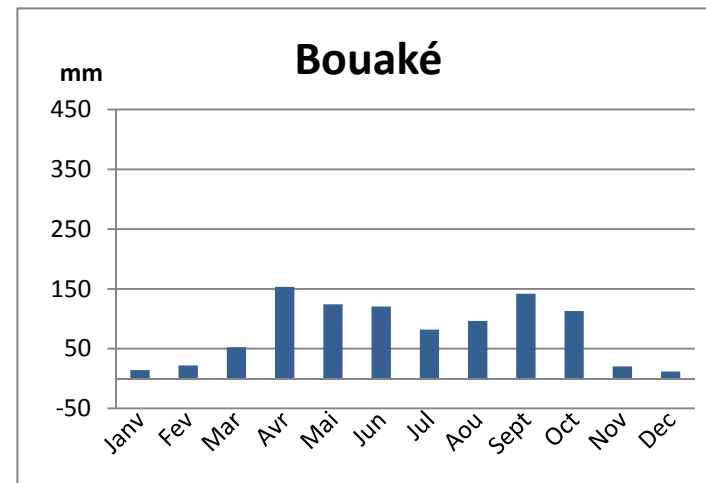


Figure 4d: Moyennes pluviométriques mensuelles à Bouaké

Le sol est majoritairement représenté par des vertisols dont la texture très argileuse. La culture du riz se maintient exclusivement sur les sols les plus légers où le semis direct peut être pratiqué.

2.2.5.2. *La station du CNPAF à Goiania (Brésil)*

La station du CNPAF (Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijo) est localisée dans l'état de Goias, au cœur des « Cerrados » qui caractérisent la savane brésilienne (16° 30' de latitude sud, 49° 24' de longitude ouest, 800 m d'altitude). Le climat y est tropical semi-humide à une saison des pluies d'intensité très variable de septembre à avril. La pluviométrie annuelle varie de 800 à 1600 mm selon les années (Figure 4c).

La culture du riz pluvial y a été pratiquée sur des sols ferrallitiques profonds et très fertiles, en tant que tête d'assolement lors de la mise en culture du « front pionnier » qui s'est développé à partir de Brasilia depuis les années 70

2.2.5.3. *La station de l'ADRAO à Bouaké (Cote d'Ivoire).*

Elle est située au centre de la Cote d'Ivoire en zone de savane humide (7° 43' de latitude nord, 5° 02' de longitude ouest, 294 m d'altitude). Elle est soumise à une pluviométrie très variables d'une année sur l'autre, avec certaines années présentant un climat de type équatorial à deux saisons des pluies, ou bien de type soudano-sahélien à une saison sèche et une saison des pluies. Les moyennes pluviométriques annuelles varient entre 800 et 1200 mm (Figure 4d).

Les sols sont de type ferrallitique, souvent peu profonds où le développement racinaire est fréquemment limité par la présence d'un horizon induré (cuirasse). Ils présentent une forte tendance à l'acidification, avec des risques de toxicité aluminique considérée comme une des contraintes majeures de ces sols pour les cultures.

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel STATISTICA- Version 9.

3. RESULTATS

3.1. Calibrage du modèle

Les paramètres génotypiques ont été ajustés à partir des données expérimentales obtenues pour huit variétés de riz pluvial expérimentées en 2006 sur le site de Santa-Rosa (Tableau 3).

Tableau 3 : valeurs des paramètres calibrés pour les huit variétés de riz expérimentées en 2006 à Santa-Rosa

VARIETES	SDJ BVP (°Cj)	SDJ Matu1 (°Cj)	SDJ Matu2 (°Cj)	Phyllo Chrono (°Cj)	Sla Min (g.ha ⁻¹)	Sla Max (g.ha ⁻¹)	Atten Mitch	Leaf Length Max (mm)	Coeff Leaf Death	Til Ability	Coeff Tiller Death	Haun Crit Tillering	Internode Length Max (mm)	Coeff Internode Mass (mg.mm ⁻¹)	Coeff Panicle Mass	CoeffRoot MassPer VolMax (g.m ⁻³)
CICA8	1080	320	140	60	1,8	6,0	0,998	350	0,10	0,4	0,06	2,5	65	2,0	0,003	0,20
CIRAD409	450	350	180	70	1,9	6,0	0,997	450	0,04	1,1	0,01	2,0	75	1,5	0,006	0,25
ESPERANZA	700	350	160	65	1,6	9,0	0,996	550	0,04	0,5	0,05	3,0	85	1,8	0,015	0,25
FEDEARROZ 50	990	350	180	75	2,0	4,5	0,998	485	0,08	0,5	0,03	2,5	70	1,5	0,007	0,30
PCT-4/975	520	350	140	75	2,1	6,0	0,997	450	0,08	1,5	0,12	2,5	80	1,5	0,003	0,15
ORYZA SABANA 6	730	350	140	70	2,0	7,0	0,997	500	0,10	0,4	0,10	2,0	70	1,0	0,003	0,30
SAQUAREMA	885	350	140	70	1,7	7,0	0,997	500	0,10	0,3	0,15	2,5	50	1,2	0,003	0,30
WAB77597	700	350	160	75	1,7	9,0	0,997	600	0,07	0,4	0,10	2,5	70	2,0	0,007	0,50
MOYENNE	756,8	346,25	155	70	1,8	6,8	0,997	485,6	0,076	0,64	0,078	2,44	70,6	1,56	0,0058	0,28
CV(%)	28,8	3,1	11,4	7,6	9,6	22,9	0,06	15,3	32,8	67,0	61,6	13,1	14,8	22,9	70,1	36,7

3.1.1. Calibrage de la phénologie

La durée entre le semis et la levée est considérée comme constante avec un paramètre *SDJLevee* dont la valeur est fixée à 50°Cj, ce qui correspond à une levée environ 3 jours après semis.

La durée de la phase reproductive est aussi considérée constante pour tous les génotypes de riz. Le paramètre *SDJRPR* est fixé à 420 °Cj pour toutes les variétés.

La durée de la phase végétative (*SDJBVP*) varie de façon conséquente entre 450°Cj et 1080 °Cj en fonction du génotype, avec un coefficient de variation de 28,8%. Les variétés les plus tardives sont CICA 8 et FEDEARROZ 50 avec des durées de phase végétative respectivement de 1080 et 990 °Cj, tandis que les variétés les plus précoces sont PCT-4/975 et CIRAD 409 avec des durées respectivement de 520 et 450 °Cj.

Les phases de remplissage et d'assèchement des grains ont des durées qui varient très peu, de 320 à 350°Cj pour *MATU1* et de 140 à 180 °Cj pour *MATU2*.

3.1.2. Calibrage de la surface spécifique des feuilles

L'ajustement de la courbe du SLA a été réalisée en faisant varier les valeurs des paramètres *SLAMin* et *SLAMax* entre 1,6 et 2,1 E⁻³ pour le premier paramètre et entre 4,5 et 9,0 E⁻³ pour le second. Par contre, le paramètre *AttenMich* fixant la forme de la courbe présente un coefficient de variation très faible de 0,06%, avec des valeurs comprises entre 0,996 à 0,998.

3.1.3. Calibrage de l'architecture de la plante

La longueur maximale des feuilles (*LeafLengthMax*) reproduit les caractéristiques des types *indica* à feuilles courtes et *japonica* à feuilles plus longues. On retrouve ainsi la valeur la plus faible pour CICA 8 et la plus grande pour WAB77597 qui est un *japonica* amélioré. Le caractère variétal « Stay green » simulé au travers du coefficient de mortalité des feuilles (*CoefLeafDeath*) est fortement lié aux génotypes avec des valeurs variant de 0,04 à 0,1 correspondant à une de variation de près de 33%.

L'ajustement des courbes de tallage à l'aide du paramètres *TilAbility*, qui détermine la capacité de la plante à émettre des talles, et de *CoefTillerDeath* qui fixe la diminution du nombre de talles entre le tallage maximum et le tallage à la récolte, a été réalisé en faisant varier fortement ces paramètres entre les génotypes, avec respectivement des coefficients de variation de 67 et 62%. D'autre part, le paramètre *HaunCritTillering*, qui fixe le nombre de feuilles minimum nécessaire sur la tige pour l'initiation d'une nouvelle talle, a pris des valeurs variant 2 à 3 feuilles de façon à pouvoir simuler un nombre de talles suffisant pour les variétés les plus précoces.

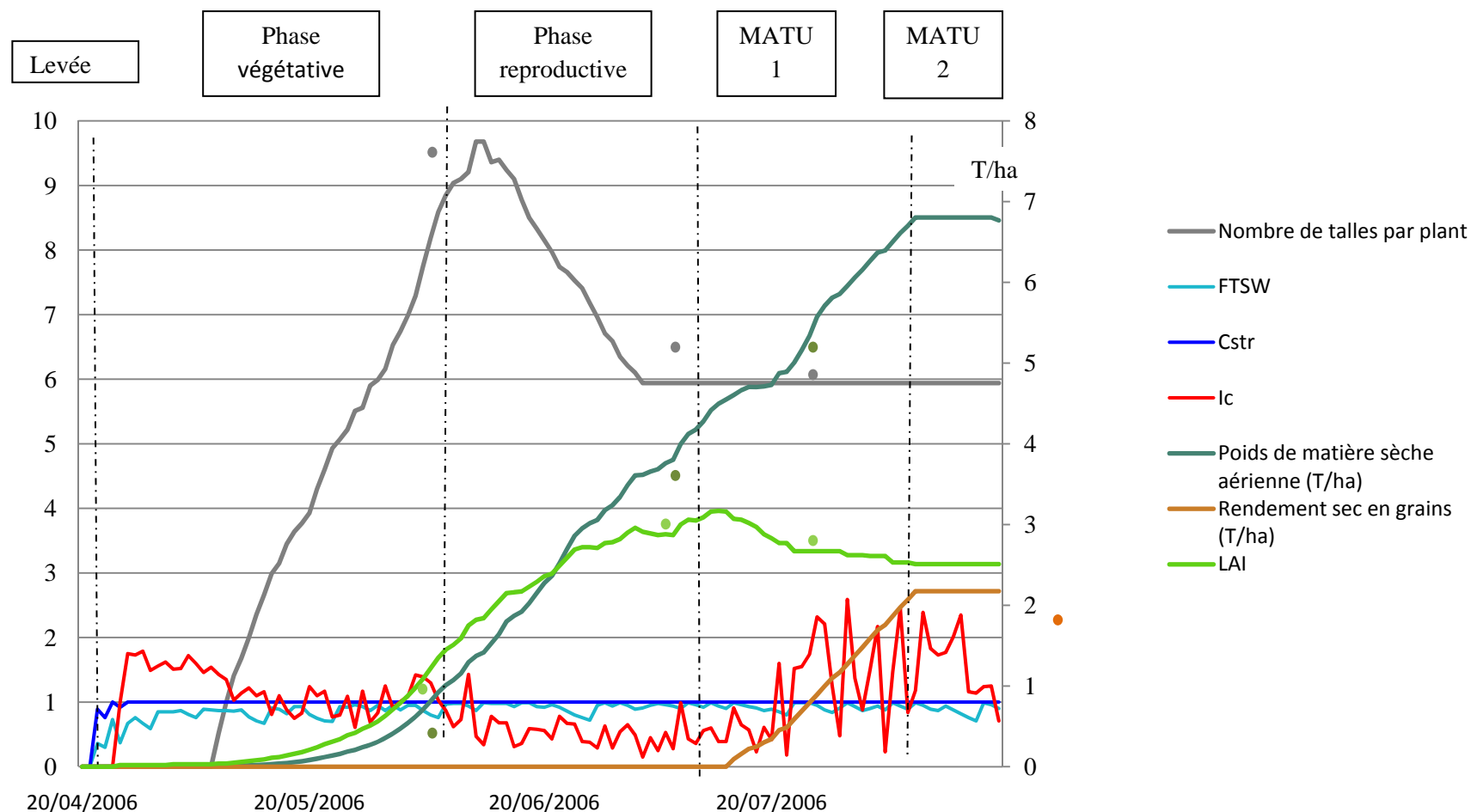


Figure 5 : Simulation de la croissance de la variété ESPERANZA dans les conditions d'expérimentation de Santa-Rosa en 2006. Les variables de sortie représentées ici sont le LAI (vert clair), le nombre de talles par plant (gris), le poids de matière sèche aérienne (vert-foncé) et le rendement sec en grains (marron). Les valeurs observées sont représentées par des points de même couleur. Les variables d'état I_c (rouge), FTSW (bleu clair) et Cstr (bleu foncé) sont des indicateurs du statut physiologique de la plante dans cet environnement. L'indice de compétition I_c est inférieur à 1 durant la phase reproductive indiquant un déséquilibre entre les ressources et la demande de la plante durant cette phase. Le Cstr = 1 indique qu'aucun stress hydrique n'est intervenu durant le cycle.

Les hauteurs des différents génotypes ont été simulées en estimant des valeurs du paramètre *InternodLengthMax* entre 50 à 85 mm, tandis que le paramètre *CoeffInternodeMass* déterminant la masse par unité de longueur des entrenœuds varie de 1,0 à 2,0 mg/mm.

Les données dont nous disposons pour le système racinaire n'ont permis de quantifier des différences entre génotypes qu'en utilisant le paramètre *CoeffRootMassPerVolMax* qui représente le poids maximal de racines que la plante peut produire par unité de volume de sol. Ce paramètre varie de près de 37% pour la gamme des variétés étudiées.

3.1.4. Calibrage de l'élaboration du nombre de grains et de leur niveau de remplissage

Le paramètre *CoeffpaniculeMass* détermine la vitesse de croissance de la partie structurale de la panicule. Sur la base d'un rapport constant existant entre le poids de grains et le poids de la partie structurale de la panicule, ce paramètre permet d'ajuster assez finement le rendement en grain de la plante. Ce coefficient varie fortement en fonction des variétés entre les valeurs de 0,3 et 1,5 E⁻², soit une variation de plus de 70%.

Le poids de 1000 grains est calibré par le paramètre *PoidsSecGrain* dont les valeurs ont été obtenues expérimentalement pour chacune des huit variétés. Ce caractère est très peu sensible à l'environnement (Dingkuhn M., communication personnelle).

La figure 5 reproduit la simulation réalisée à l'aide du modèle SAMARA de la croissance d'une variété de riz (ESPERANZA) cultivée dans les conditions de l'expérimentation de Santa-Rosa en 2006. Les courbes d'évolution du tallage, du LAI et de production de biomasse aérienne (MSA), ainsi que le rendement, sont ajustées aux valeurs observées. Les variables d'état *Ic*, *FTSW* et *Cstr* renseignent sur l'état physiologique de la plante. En particulier, on notera un indice de compétition *Ic* inférieur à 1 durant la phase reproductive, période où la demande énergétique de la plante est particulièrement forte, ainsi qu'un *Cstr* de 1 tout le long du cycle indiquant qu'aucun stress hydrique n'est intervenu sur la culture.

3.2. Evaluation du modèle

Le modèle a été testé sur les données expérimentales obtenues en 2007 et 2008 sur la station de Santa-Rosa. Les comparaisons entre les valeurs observées et simulées (Tableau 4) montrent une assez bonne prédiction par le modèle des variables observées.

Les simulations rendent compte le mieux des données observées pour les variables phénologiques déterminant les dates de floraison et les durées de cycle de culture, avec respectivement 92% et 90% des variances expliquées par le modèle. Néanmoins, le modèle sous-estime la durée du cycle

Tableau 4 : résultats des comparaisons entre les données observées et simulées à l'aide du modèle SAMARA dans les conditions culturales des expérimentations réalisées à Santa-Rosa en 2007 et 2008

Variabes	Moyennes observées	Moyennes simulées	Biais	RSME	CVe (%)	r ²	Y _{obs} = f(Y _{sim})
Rendement (T/ha)	1,93	2,20	-0,28	0,64	33,2	0,551	Y = 0,882* X
Matière sèche aérienne (T/ha)	3,45	4,08	-0,64	1,43	37,7	0,714	Y = 0,805 *X
SLA (g/ha)	2,54	2,65	-0,11	0,25	9,6	0,799	Y = 0,963 *X
LAI (m ² /m ²)	1,92	2,02	0,09	0,35	18,3	0,821	Y = 0,926 *X
Nb de panicules par plant	9,1	10,1	-1,0	1,8	19,3	0,896	Y = 0,911 *X
Nombre de jours à la floraison (jas)	87,5	86,8	0,7	4,5	5,1	0,924	Y = 1,012* X
Durée du cycle (jours)	122	120	2	5,4	4,5	0,896	Y = 1,018* X

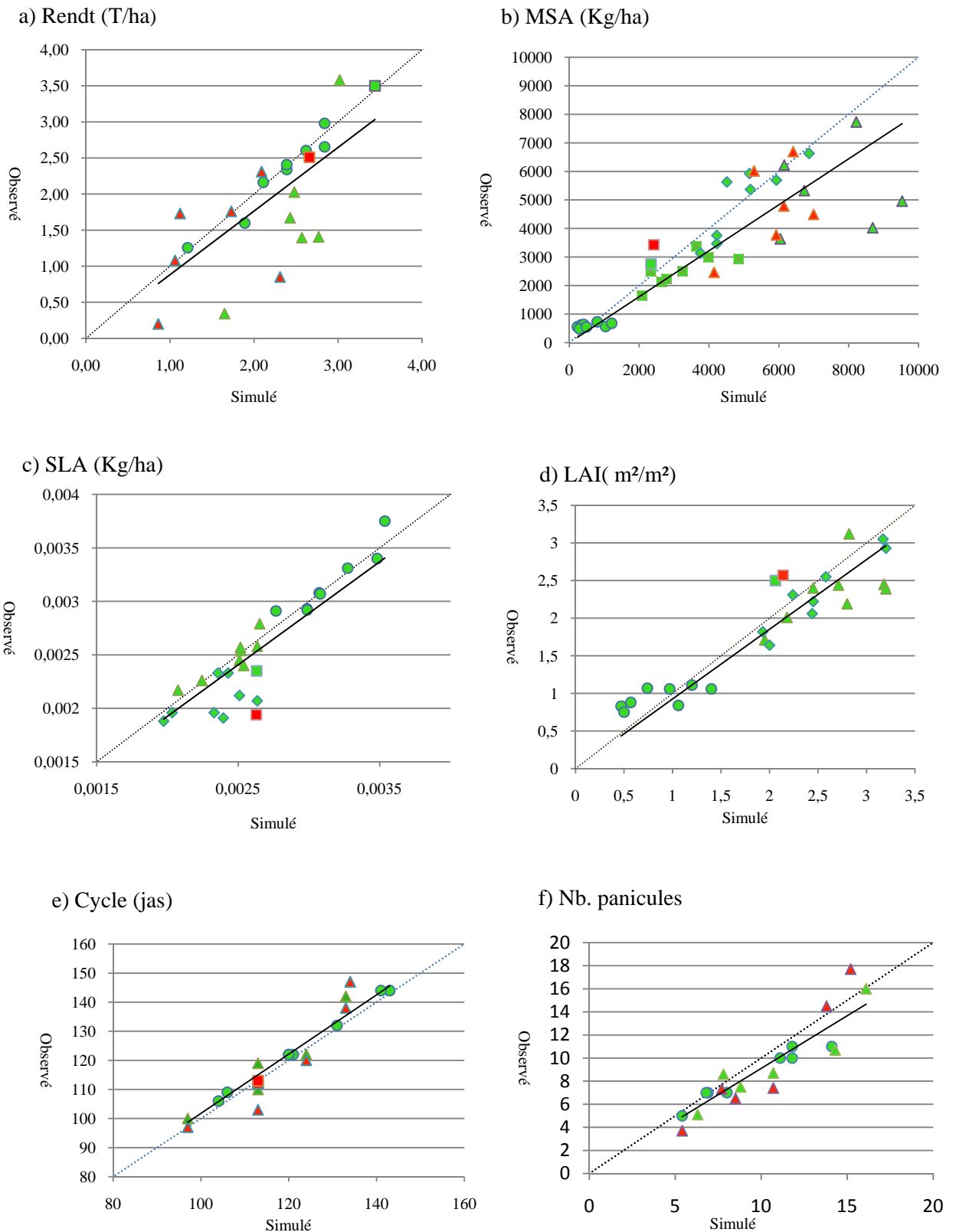


Figure 6 : valeurs observées pour le rendement (a), le poids de matière sèche aérienne (b), le SLA (c), le LAI (d), la durée du cycle (e) et le nombre de panicules à la récolte (f), en fonction des valeurs simulées par le modèle SAMARA. La droite en pointillée représente la droite d'équation $y=x$ et la droite en trait plein l'ajustement linéaire des données. Les points représentent les données obtenues en 2006 (ronds), en 2007 (triangulaires) et en 2008 (carrés), sans stress hydrique (verts) et avec stress hydrique (rouges).

Sites	Variétés	Rendement (T/ha)	Nombre panicules/ha	Poids de grains par panicule (g)	Sterility Drought (%)	GrainFilling Status (%)	Ic Mean	Ftsw Moy (%)
Bouake	CICA8	0,29 ^{bc}	3515 ^a	0,093 ^b	32	51	0,64	57
	CIRAD409	1,30 ^a	2774 ^a	0,470 ^a	0	82	0,70	72
	ESPERANZA	0,73 ^b	1851 ^b	0,430 ^a	16	74	0,62	54
	FEDEARROZ50	0,59 ^b	2857 ^a	0,236 ^{ab}	26	59	0,62	58
	PCT-4-975	1,15 ^a	3220 ^a	0,401 ^a	0	69	0,69	70
	SAQUAREMA	0,07 ^c	1491 ^b	0,075 ^b	0	36	0,52	69
	WAB77597	0,66 ^b	1885 ^b	0,385 ^a	6	56	0,64	61
	<i>Moyenne</i>	<i>0,68</i>	<i>2513</i>	<i>0,299</i>	<i>11</i>	<i>61</i>	<i>0,63</i>	<i>63</i>
Goiania	CICA8	1,06 ^d	5417 ^b	0,194 ^c	11	75	0,75	79
	CIRAD409	2,60 ^{ab}	7111 ^a	0,394 ^{bc}	0	85	0,73	87
	ESPERANZA	2,02 ^{bc}	2466 ^c	0,847 ^a	2	82	0,71	78
	FEDEARROZ50	1,55 ^{cd}	5008 ^b	0,313 ^{bc}	15	83	0,74	81
	PCT-4-975	3,08 ^a	5798 ^b	0,581 ^c	0	83	0,78	87
	SAQUAREMA	1,44 ^{cd}	2674 ^c	0,579 ^b	8	90	0,83	84
	WAB77597	1,99 ^{bc}	3146 ^c	0,649 ^b	2	85	0,79	78
	<i>Moyenne</i>	<i>1,96</i>	<i>4517</i>	<i>0,508</i>	<i>5</i>	<i>83</i>	<i>0,76</i>	<i>82</i>
Palмира	CICA8	0,27 ^b	6198 ^a	0,041 ^d	45	34	0,65	43
	CIRAD409	2,78 ^a	3678 ^c	0,763 ^a	5	77	0,78	70
	ESPERANZA	1,35 ^b	2927 ^d	0,495 ^{ab}	22	57	0,68	62
	FEDEARROZ50	0,74 ^b	5156 ^b	0,145 ^{cd}	33	44	0,65	54
	PCT-4-975	2,61 ^a	5058 ^b	0,554 ^{ab}	11	63	0,75	63
	SAQUAREMA	0,82 ^b	2977 ^d	0,282 ^{bcd}	29	62	0,73	51
	WAB77597	1,45 ^b	3761 ^c	0,411 ^{bc}	22	57	0,74	63
	<i>Moyenne</i>	<i>1,43</i>	<i>4251</i>	<i>0,384</i>	<i>24</i>	<i>56</i>	<i>0,71</i>	<i>58</i>
Santa-Rosa	CICA8	1,20 ^d	5233 ^a	0,233 ^f	0	89	0,81	91
	CIRAD409	2,77 ^b	3183 ^c	0,873 ^{bc}	0	97	0,82	94
	ESPERANZA	2,48 ^c	2552 ^d	0,992 ^{ab}	0	84	0,74	95
	FEDEARROZ50	2,25 ^c	4161 ^b	0,540 ^e	0	84	0,78	90
	PCT-4-975	3,18 ^a	4221 ^b	0,767 ^{cd}	0	91	0,84	93
	SAQUAREMA	1,54 ^d	2448 ^d	0,645 ^{de}	0	95	0,86	89
	WAB77597	2,83 ^b	2686 ^d	1,078 ^a	0	80	0,81	95
	<i>Moyenne</i>	<i>2,32</i>	<i>3497</i>	<i>0,732</i>	<i>0</i>	<i>88</i>	<i>0,81</i>	<i>92</i>
<i>Moyenne générale</i>		<i>1,69</i>	<i>3763</i>	<i>0,503</i>	<i>9</i>	<i>74</i>	<i>0,74</i>	<i>75</i>
<i>Écartype</i>		<i>1,09</i>	<i>1530</i>	<i>0,346</i>				
Effet variété		HS*	HS*	HS*				
Effet site		HS*	HS*	HS*				
Interaction Variété site		HS*	HS*	HS*				

*HS = Effet significatif au seuil de 0,01

Classements des moyennes par test de Newman-Keuls, groupes homogènes au seuil $\alpha=0,05$

Tableau 5 : Résultats des simulations de la culture de 7 variétés de riz sur 4 sites différents

de culture d'environ deux jours correspondant à un coefficient de variation (Cve) situé aux alentours de 5% (Figure 6e).

La prédiction du rendement en grains apparaît la plus imprécise avec seulement un peu plus de la moitié de la variance expliquée par le modèle ($r^2 = 0,55$) et un Cve de 33,2%. Le modèle surestime en moyenne le rendement d'une valeur proche de 0,3 t/ha. Mais cette erreur n'est pas répartie régulièrement au sein de l'échantillonnage. En fait, les rendements simulés pour les essais conduits en 2007 apparaissent plus fortement surestimés, alors que autres simulations s'alignent plutôt bien sur les valeurs observées (Figure 6a).

La biomasse aérienne est, par contre, mieux prise en compte que le rendement en grain par le modèle avec un r^2 de 0,71 au lieu de 0,55 pour le rendement en grain. Le modèle surestime aussi la quantité de biomasse produite avec un biais d'environ 0,6 T/ha, mais l'erreur relative est bien répartie sur l'ensemble de la gamme des valeurs observées, avec un Cve de 37,8% (Figure 6b).

Le SLA et le LAI sont assez bien prédits par le modèle avec des coefficient de corrélation r^2 de l'ordre de 0,8 et des faibles variations estimées par un Cve de 9,6% et de 18,3% respectivement (Figures 6c et 6d).

Le nombre de panicules par plant est aussi légèrement surestimé par le modèle comme l'indique le biais négatif d'une panicule par plant. La corrélation entre les valeurs observées et simulées est bonne avec un r^2 de près de 0,90 et des écarts moyens correspondant à un Cve de 19,3% (figure 6f).

3.3. Simulations pour différents sites de culture

Le modèle a été utilisé pour prédire le comportement dans des environnements différents de plusieurs variétés dont les paramètres génotypiques sont contrastés. Les sites choisis sont Santa-Rosa en zone amazonienne, Palmira en zone équatorienne d'altitude élevée, Goiania dans les Cerrados brésiliens et Bouaké en limite de savane africaine. L'analyse s'est focalisée sur les variations du rendement en grain (*GrainYieldPop*), du nombre de panicules par hectare (*PaniculeNumPop*) et du poids de grains par panicules (*GrainYieldpanicule*). Parallèlement, l'état hydrique du sol a été quantifié grâce au FTSW moyen sur le cycle, ainsi que les effets de l'environnement sur le statut interne de la plante grâce à l'indice interne de compétition moyen (*IcMean*). Le suivi du taux de stérilité dû à un déficit hydrique (*SterilityDrought*) et du taux de remplissage des grains (*GrainFillingStatus*) permettent d'évaluer les effets de l'environnement durant les phases reproductive et de maturation particulièrement sensibles aux conditions d'alimentation hydrique.

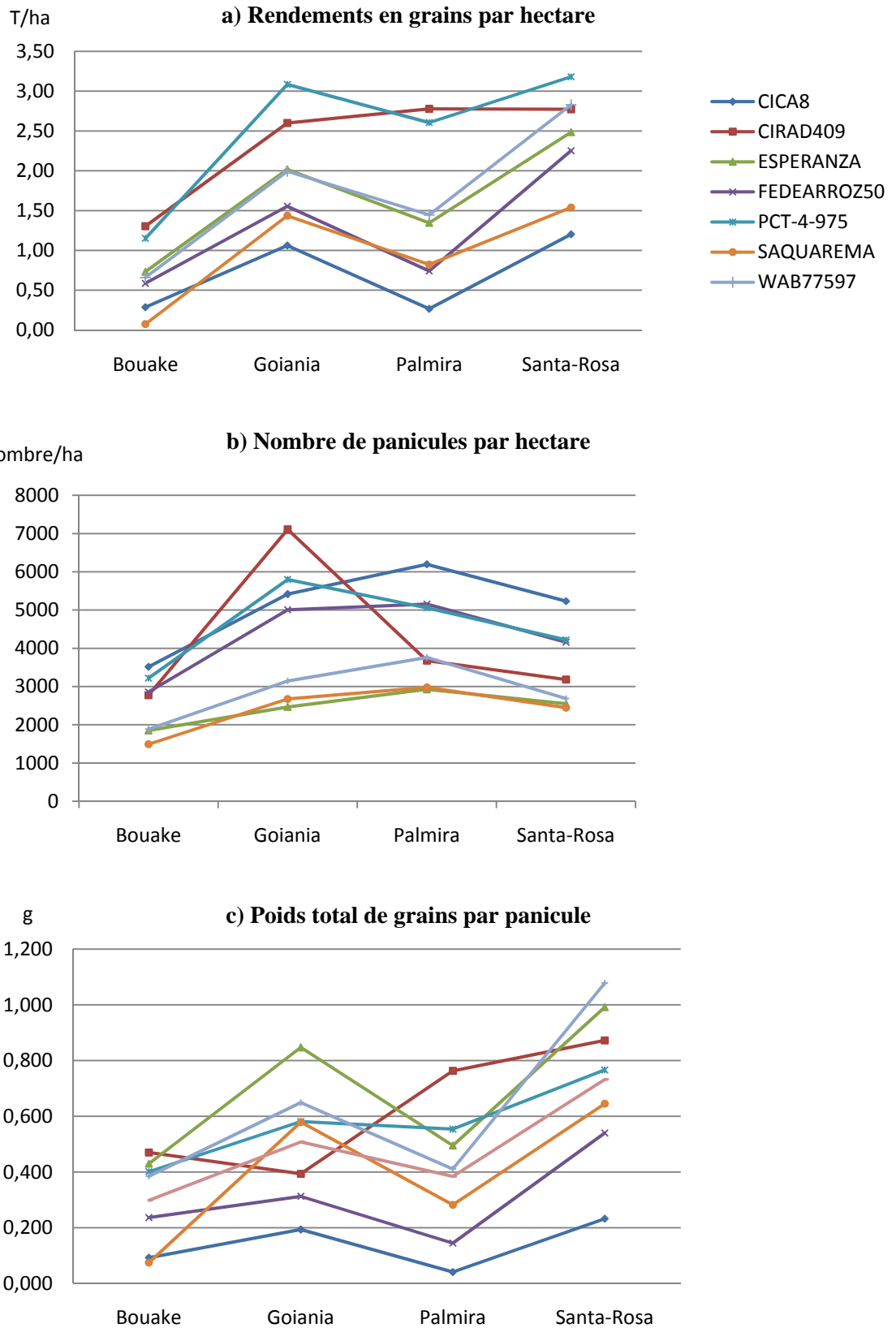


Figure 7 : Résultats des simulations du rendement en grains (a), du nombre de panicules (b) et du poids de grains par panicule (c) pour sept variétés de riz dans quatre environnements

L'analyse de ces simulations montre que le modèle reproduit des différences hautement significatives entre les variétés et entre les sites. Elle met aussi en évidence l'existence d'interactions hautement significatives entre sites et variétés (Tableau 5).

Le site de Santa-Rosa est le plus productif avec un rendement moyen de 2,3 T/ha, tandis que le moins propice à la culture de ces variétés est Bouaké avec un rendement moyen de 0,7 T/ha (tableau 6). Le classement est identique pour le poids de grains par panicule qui apparaît comme une caractéristique déterminante pour l'élaboration du rendement. Le nombre de panicules par hectare est plus élevé à Goiania et particulièrement faible à Bouaké (Figures b et c).

Tableau 6 : Classement des sites en fonction de leur productivité

Sites	Rendement grains (t.ha ⁻¹)	Nombre de panicules / ha (x 1000)	Poids total de grains par panicules (g)
BOUAKE	0,68 ^d	2513 ^d	0,30 ^d
PALMIRA	1,43 ^c	4251 ^b	0,38 ^c
GOIANIA	1,96 ^b	4517 ^a	0,51 ^b
SANTA-ROSA	2,32 ^a	3497 ^c	0,73 ^a

* Classement des moyennes par test de Newman-Keuls, groupes homogènes au seuil $\alpha = 0,05$

Sur l'ensemble des sites, les variétés CIRAD 409 et PCT-4-975 sont les plus productives avec des moyennes de rendements respectivement de 2,4 et de 2,6 T/ha. Inversement, les variétés les plus tardives, ainsi que la variété traditionnelle SAQUAREMA sont les moins productives (Tableau 7).

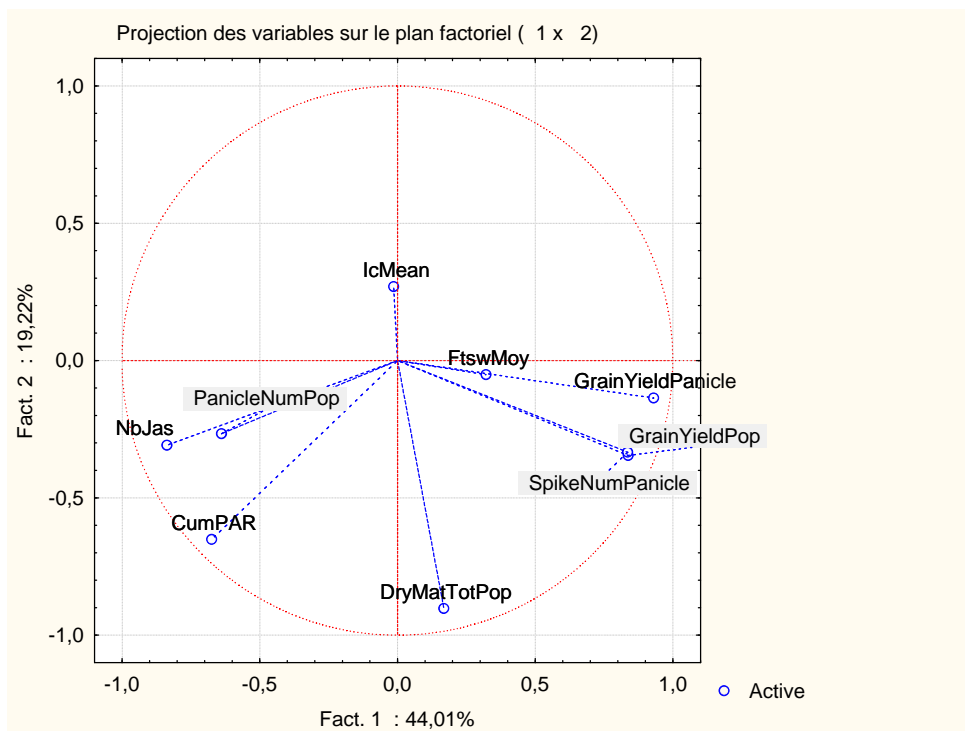
Tableau 7 : Classement des variétés en fonction de leur productivité

Variétés	Rendement grains (t.ha ⁻¹)	Nombre de panicules / ha (x 1000)	Poids total de grains par panicules (g)
CICA8	0,76 ^e	5182 ^a	0,15 ^c
SAQUAREMA	1,05 ^d	2451 ^e	0,42 ^e
FEDEARROZ50	1,37 ^c	4376 ^b	0,32 ^d
ESPERANZA	1,74 ^b	2484 ^e	0,72 ^a
WAB77597	1,84 ^b	2915 ^d	0,66 ^{ab}
CIRAD409	2,44 ^a	4277 ^c	0,64 ^{ab}
PCT-4-975	2,62 ^a	4653 ^b	0,59 ^b

* Classement des moyennes par test de Newman-Keuls, groupes homogènes au seuil $\alpha = 0,05$

L'interaction Variété x Site hautement significative détectée sur ces variables indique que les classements relatifs en terme de rendement (et de ses composantes) peuvent être très différents selon les sites. Néanmoins, il semblerait qu'une large part de ces interactions provienne des variétés CIRAD409 et SAQUAREMA dont les classements sont inversés à Bouaké et/ou à Palmira (figure 7).

a) Santa-Rosa



b) Palmira

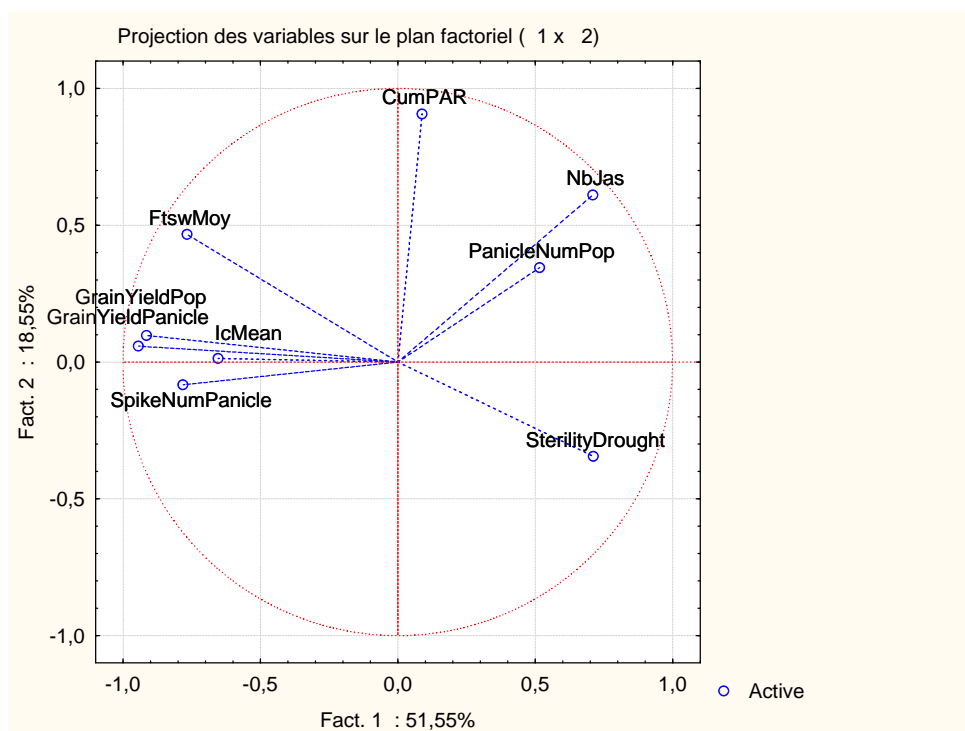


Figure 8 : Analyse en composante principale des variables de sortie du modèle SAMARA réalisées sur 10 années dans les situations de Santa-Rosa où aucun déficit hydrique n'est intervenu (a) et de Palmira où les périodes de déficit hydrique sont fréquentes (b)

3.4. Analyse des corrélations entre les variables du modèle

Les corrélations existant entre les variables issues des simulations réalisées par le modèle en différentes situations ont été étudiées par la méthode d'analyse en composante principale. Deux situations contrastées ont été prises en compte, l'une représentative d'une situation où la culture ne rencontre pas ou peu de stress hydrique (Santa-Rosa), tandis que l'autre concerne à l'inverse une situation où des déficits hydriques apparaissent fréquemment durant le cycle de culture (Palmira).

A Santa-Rosa (Figure 8a), les deux axes principaux expliquent 63% de la variance totale. Le rendement (*GrainYieldPop*) est fortement corrélé au nombre de grains par panicules (*SpikeNumPanicule*) et au poids de grains par panicules (*GrainYieldPanicule*). Par contre, il est peu corrélé à la durée du cycle (*NbJas*), mais aussi paradoxalement au nombre de panicules par hectare (*PaniculeNumPop*). Les variables indicatrices de l'état hydrique de la culture (*FtswMoy*) et de son statut physiologique (*IcMean*) apparaissent, par contre, peu liées au rendement dans ces conditions quasi-optimales de culture.

A Palmira (Figure 8b), les axes du graphique expliquent plus de 70% de la variance. Le rendement est, de même que précédemment, fortement corrélé au poids de grains par panicule (*GrainYieldPanicule*) et au nombre de grains par panicules (*SpikeNumPanicule*), mais il demeure très peu corrélé au nombre de panicules par hectare (*PaniculeNumPop*) ainsi qu'à la durée du cycle (*NbJas*). La stérilité due à la sécheresse (*SterilityDrought*) apparaît nettement comme un facteur négatif pour le rendement, tandis que les variables *Ftsw* et *IcMean* deviennent dans ces conditions de ressources en eau limitées nettement corrélées positivement au rendement.

La quantité d'énergie reçue (*CumPAR*) à Palmira et à Santa-Rosa est, dans les deux situations, peu reliée aux niveaux de rendements obtenus. Il apparaît d'autre part un faible lien entre le rendement en grain (*GrainYieldPop*) et la production totale de biomasse (*DryMatTotPop*). Cela indiquerait le rôle important que joue l'indice de rentabilité (*HarvestIndex*) dans la variance créée par le modèle.

3.5. Etude de sensibilité du modèle

Cette étude a été réalisée pour tester l'influence des paramètres génotypiques sur les rendements obtenus. La sensibilité du modèle a ainsi été évaluée dans les deux situations choisies précédemment pour leurs caractéristiques contrastées en matière d'alimentation hydrique (Santa-Rosa et Palmira). Seuls les paramètres phénotypiques présentant une variabilité importante ont été pris en compte, et ceci dans un intervalle de valeurs testées expérimentalement (Tableau 8).

Les paramètres affectant le plus le rendement sont *SDJBVP* et *CoeffPaniculeMass* qui provoquent une variation sur le rendement de l'ordre de 40%, mais l'effet le plus important provient de

Paramètres	Intervalle de valeurs testées		Santa-Rosa (Cstr moy =1)		Palmira (Cstr moy < 1)	
	Mini	Maxi	Rend (T/ha)	CV%	Rend (T/ha)	CV%
ASSCstr	0,3	0,7	Pas d'effet		1,92	4,83
KCritSterFtsw1	0,3	0,7	Pas d'effet		1,67	34,4
KCritSterFtsw2	0,05	0,35	Pas d'effet		1,67	34,9
SDJBVP	400	1100	1,62	39,6	0,95	76,7
Phyllo	60	75	2,02	28,8	1,73	18,7
CoefRootMassPerVolMax	0,0001	0,0005	2,19	9,5	1,99	6,5
InternodeLengthMax	50	85	2,22	15,8	1,99	18,1
CoeffInternodeMass	0,001	0,003	2,2	21,4	1,96	24,0
SlaMin	0,0016	0,0021	2,59	29,5	1,83	28,4
SlaMax	0,0045	0,009	2,04	9,9	Non testé	
LeafLengthMax	350	600	1,82	28,2	1,64	24,6
CoeffLeafDeath	0,04	0,1	2,1	10,9	2,03	13,3
TilAbility	0,3	1,2	2,09	12,0	1,87	11,5
CoeffTillerDeath	0,01	0,2	2,18	1,2	Non testé	
HaunCritTillering	2	3	2,18	4,1	Non testé	
CoeffPaniculeMass	0,003	0,15	1,87	41,0	1,5	35,5

Tableau 8 : Etude de sensibilité du rendement simulé aux variations de différents paramètres génétiques dans deux environnements cultureux de régime hydrique contrasté..

SDJBVP en situation de stress hydrique qui se traduit par une variation du rendement atteignant 76,7%.

Les paramètres *KCritSterFtsw1* et 2 ont aussi un effet important en situation de stress hydrique, avec 34 et 35% de variation sur le rendement. A l'inverse, le phyllochrone (*Phyllo*) semble avoir plus d'effet en condition de bonne alimentation en eau (28,8%) qu'en situation de stress (14,6%)

Les autres paramètres ont une sensibilité comparable que ce soit en conditions de stress ou sans stress hydrique. Néanmoins, les plus remarquables sont *CoeffInternodeMax*, *LeafLengthMax* et *SlaMin* qui influent sur le rendement à hauteur de 20 à 30%, tandis que les autres paramètres ont moins d'effets et provoquant des variations du rendement inférieures à 15%.

Le caractère « Stay-green », qui se retrouve dans le paramètre *CoefLeafDeath*, influe modérément sur les rendements provoquant une variation de 11 à 13% avec un effet légèrement plus fort en situation de stress.

Par ailleurs, on notera les faibles effets sur le rendement des paramètres *TilAbility*, *CoefTillerDeath* et *HaunCritTillering* qui n'expliquent respectivement que 12%, 1,2% et 4,1% de variations du rendement. Cela pourrait provenir des faibles relations existant entre le niveau du tallage maximum que la plante peut atteindre et le nombre de panicules fertiles entrant dans la composition du rendement dans les conditions expérimentales concernée par l'étude.

3.6. Evolution des rendements simulés en fonction des paramètres génotypiques les plus influents

Les effets sur le rendement en grain (*GrainYieldPop*) des paramètres phénotypiques les plus influents ont été simulés dans les conditions de Santa-Rosa et de Palmira.

Dans les deux situations étudiées, le rendement le plus élevé est obtenu avec une durée de la phase végétative (*SDJBVP*) de l'ordre de 600 °Cj (figures 9a.1 et 9a.2). Mais la plus grande sensibilité du modèle causée par à ce paramètre à Palmira s'illustre par une plus forte instabilité et une diminution des rendements sur ce site lorsque *SDJBVP* augmente au dessus de 600 °Cj. Le paramètre d'ajustement de la phénologie *SDJBVP* confirme l'importance de la durée du cycle pour l'adaptation variétale, celle-ci étant d'autant plus importante dans des conditions de risques climatiques où la précocité constitue un échappement possible face au déficit hydrique

Pour le paramètre *CoeffPaniculeMass*, les meilleurs rendements sont obtenus pour des valeurs situées entre 0,006 et 0,012 quelles que soit les conditions d'alimentation hydrique (figures 9b.1 et 9b.2). Des valeurs faibles de ce paramètre, en dessous de 0,006, se traduisent par une importante diminution du rendement.

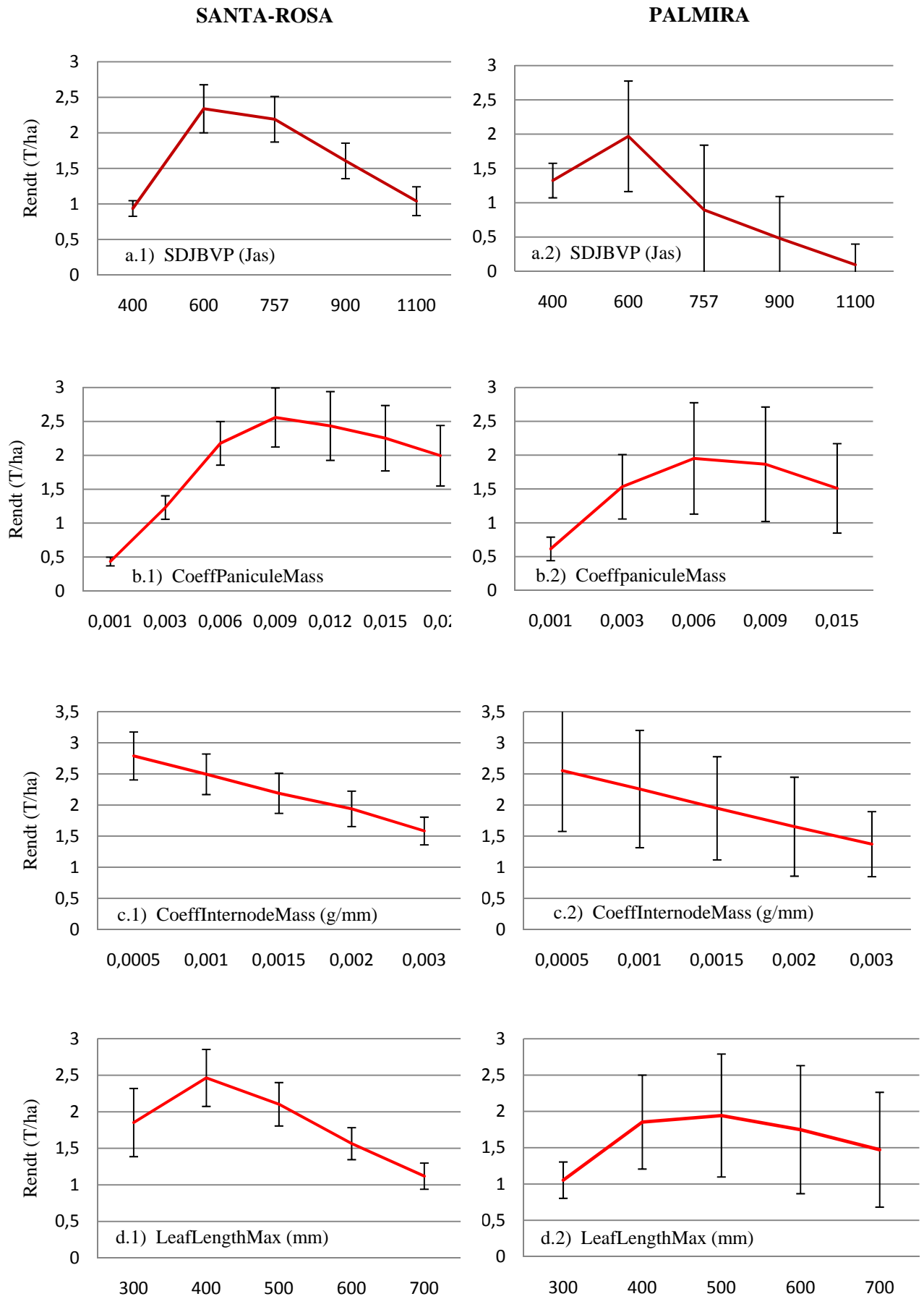


Figure 9 : Courbes d'évolution du rendement en fonction des paramètres du modèle *SDJBVP* (a), *CoeffPaniculeMass* (b), *CoeffInternodeMass* (c), *LeafLengthMax* (d), dans les environnements de Santa-Rosa (1) et de Palmira (2).

Le paramètre *CoeffInternodeMass* est influé négativement sur les rendements dans les deux situations (Figures 9c.1 et c.2). Ce paramètre intervient dans le développement de la plante essentiellement en période reproductive (phase d'élongation). L'effet négatif sur le rendement de ce paramètre peut s'expliquer par un effet de puits important constitué par l'élaboration de la biomasse de la tige, diminuant fortement l'indice de compétition I_c au détriment des parties productives en biomasse telle que la surface foliaire.

Le paramètre *LeafLengthMax* apparaît optimal pour une valeur de 400 mm dans les conditions de Santa-Rosa (Figure 9d.1) et de 500 mm pour Palmira (Figure 9d.2). Dans les deux cas, des valeurs plus faibles apparaissent insuffisantes pour assurer une surface foliaire adéquate, tandis que des valeurs plus élevées de ce paramètre semblent se traduire par une contribution moins efficace du système foliaire pour le rendement. Ces effets sont moins nets à Palmira où les variations des rendements ne permettent pas de détecter de différences pour des valeurs de *LeafLengthMax* variant de 400 à 700 mm.

4. DISCUSSION

4.1. L'approche modélisation et domaine de validité du modèle

4.1.1. Calibrage et domaine de validité du modèle

Les données obtenues dans le cadre des expérimentations mises en place à Santa-Rosa entre 2006 et 2008 ont permis de calibrer le modèle SAMARA pour différentes variétés de riz pluvial. Ce calibrage a nécessité l'utilisation de données classiques de sélection auxquelles se sont ajoutées des mesures physiologiques particulières réalisées en cours de cycle de culture.

Les dates de floraison et la durée des cycles de culture sont particulièrement bien prédites par le modèle montrant une légère sous-estimation respectivement de un et deux jours pour des cycles variant entre 90 à 144 jours. Le biais constaté à la récolte peut s'expliquer par le délai fréquent nécessaire à la mise en place de la logistique du chantier de récolte après le murissement des grains.

De manière générale, le calibrage du modèle à l'aide des paramètres génotypiques permet d'ajuster correctement les courbes de développement de la plante sur les données mesurées. Le modèle a pu ainsi reproduire pour les huit variétés calibrées les courbes d'évolution du LAI, du SLA, du tallage et de la biomasse totale, et prédire un rendement en grain proche du rendement obtenu expérimentalement. Ce calibrage a été possible pour une large gamme de paramètre indiquant que le modèle peut s'appliquer à la grande diversité existant au sein des riz cultivés.

4.1.2. Les limites du modèle SAMARA

Le calibrage du modèle nécessite l'ajustement de nombreux paramètres, qu'ils soient génotypiques ou environnementaux. Il est possible de quantifier un certain nombre de ces paramètres à partir de données expérimentales. Mais de nombreux paramètres non directement quantifiables doivent être approchés au mieux par des ajustements sur d'autres variables. Ainsi, les valeurs du paramètre *CoeffPaniculeMass* ont été essentiellement déterminées sur la base du niveau de rendement obtenu, après calibrage des autres paramètres génotypiques.

Par ailleurs, le modèle réagit de façon très sensible aux effets d'interaction existant entre les paramètres qui influent fortement sur le rapport I_c . Il est ainsi parfois difficile d'établir un compromis entre les divers paramètres de façon à aboutir à la meilleure simulation possible. Supposant que la plante réagit aux contraintes de l'environnement en cherchant à équilibrer ses besoins (puits) aux ressources environnementales (sources), on est alors tenté de calibrer le modèle en alignant le mieux possible l'indice de compétition autour de la valeur 1, sans pouvoir affirmer que cela corresponde à une réalité expérimentale.

Ainsi, la quantification des paramètres aurait été facilitée si certaines mesures non habituellement réalisées par les sélectionneurs avaient été disponibles. Les plus importantes concernent le suivi de la mise en place de l'architecture aérienne de la plante dont le nombre de feuilles apparues sur la tige principale (*HaunIndex*), la longueur de la plus grande feuille (*LeafLengthMax*) ou du plus grand entrenœud (*InternodeLengthmax*). Il aurait donc été souhaitable soit de demander aux sélectionneurs de prévoir des observations supplémentaires, mais celles-ci sont parfois de réalisation lourde et délicate, soit de mettre en place une expérimentation destinée spécifiquement au calibrage du modèle.

Une des limites du modèle a été mise en évidence lors de son évaluation pour la prédiction des rendements en grain. Cette évaluation a permis de calculer un r^2 de 0,55 entre les valeurs simulées et observées pour le rendement. Or, l'observation du graphique (Figure 6a) montre qu'une grande part de l'erreur provient d'une surestimation par le modèle des rendements observés dans les essais réalisés en contre-saison en 2007. En fait, il a été constaté sur le terrain un développement particulièrement faible du riz sur cette parcelle, vraisemblablement causé par une mauvaise adaptation des pratiques culturales aux conditions de contre-saison, inhabituelle dans cette zone (Audebert A., communication personnelle). Ainsi, le modèle permet de prévoir une grande partie de l'interaction pour des cultures cultivées dans des conditions « normales », mais il devient imprécis lorsque l'on s'éloigne des conditions culturales connues.

4.2. Le modèle SAMARA : un outil pour l'amélioration du riz

4.2.1. Choix des critères de sélection

Les simulations réalisées par le modèle pour une large gamme variétale permettent de déterminer les caractères génotypiques les plus influents sur le rendement selon le site concerné. Il renseigne ainsi les sélectionneurs sur les critères de sélection les plus pertinents à prendre en compte pour un environnement donné.

Ainsi, la vitesse du développement des panicules (*CoeffPanicleMass*), la masse et le nombre de grains par panicule (*GrainYieldPanicle*, *SpikeNumPanicle*) apparaissent comme des paramètres particulièrement influents sur le rendement dans les environnements testés. A l'inverse, les paramètres liés au tallage (*TillAbility*, *CoeffTillerDeath*, *HaunCritTiellering*), ou au nombre de panicules produites (*PanicleNumPop*) se montrent peu corrélés au rendement. Cela corrobore avec la stratégie des sélectionneurs qui ont orienté leurs travaux en direction de variétés de riz « modernes » de tallage modeste mais dont toutes les talles sont productives et portent des panicules lourdes

Le modèle indique une forte sensibilité du rendement au caractère de précocité (*SDJBVP* et *NbJas*). Il estime la durée optimale de la phase végétative à 600°CJ dans les deux cas étudiés (Figure 9.1), établissant un bon compromis entre la durée nécessaire à la plante pour produire ses organes végétatifs et les possibilités d'échappement à un stress hydrique éventuel qu'apporte la précocité. Paradoxalement, l'ACP réalisée sur les résultats des simulations faites à Santa-Rosa et à Palmira indique une faible corrélation négative entre le rendement et la durée du cycle. Cela pourrait provenir de la composition de l'échantillon variétal composé de variétés tardives anciennes et de nouvelles variétés à la fois plus précoces et plus performantes.

4.2.2. Caractérisation des environnements ciblés par les programmes de sélection variétale

Le modèle se montre particulièrement intéressant pour identifier et analyser les effets des contraintes environnementales sur le développement de la plante. Le niveau de ces contraintes est mis en évidence au travers de l'indice interne de compétition *Ic* et du coefficient de stress *Cstr* que le modèle calcule quotidiennement sur l'ensemble du cycle de culture. Il est ainsi possible de suivre l'état physiologique de la culture et d'en analyser les conséquences sur le rendement.

A Palmira, le faible niveau des rendements est expliqué par une importante stérilité induite par un déficit hydrique à l'initiation paniculaire et durant la phase reproductive, ainsi que par un faible remplissage des grains impliquant aussi un stress hydrique durant la maturation du grain.

A Bouaké, le faible nombre de panicules par hectare combiné à un faible taux de remplissage des grains est la conséquence d'un important déficit hydrique qui s'est produit depuis la phase et qui a perduré jusqu'à la phase de remplissage du grain.

Le site de Santa-Rosa est représentatif d'un environnement où l'alimentation hydrique est excédentaire, se traduisant par l'absence de stérilité des grains, un remplissage et un poids de grains par panicule important, et des rendements les plus élevés des quatre sites. C'est aussi sur ce site que le modèle simule des indices de compétition Ic moyens les plus forts et un statut hydrique du sol favorable estimé par une F_{tsw} moyenne de 92%. Les caractéristiques de Goiania se différencient du site de Santa-Rosa par un léger déficit hydrique mis en évidence par une F_{tsw} moyenne de 82%. Un taux de stérilité de plus de 10% apparaît sur ce site pour les variétés les plus tardives (CICA 8 et FEDEARROZ 50).

La recherche de variétés adaptées à chaque environnement sera ainsi facilitée par une caractérisation de ces environnements prenant en compte leurs effets sur le développement de la culture.

4.2.3. *Analyse des interactions Génotype x Environnement et définition d'idéotypes*

L'analyse des résultats des simulations réalisées sur Santa-Rosa, Palmira, Goiania et Bouaké a mis en évidence une interaction hautement significative des effets variétaux et environnementaux. Ces phénomènes d'interactions compliquent fortement la tâche des sélectionneurs traditionnels qui doivent alors multiplier leurs expérimentations sur chacun des sites pour identifier les meilleurs choix variétaux. Face à cette difficulté, le modèle se présente comme un puissant outil d'analyse de ces interactions susceptible d'aider les programmes d'amélioration à rationaliser leurs schémas et à augmenter ainsi l'efficacité de leurs travaux.

En particulier, l'utilisation du modèle pourra servir à définir des idéotypes variétaux dont les paramètres génotypiques correspondent à une combinaison spécifiquement performante pour un environnement ciblé. Inversement, le modèle pourra être utilisé pour déterminer des groupes d'environnements pour lesquels les sélectionneurs chercheront à développer des variétés dont les caractéristiques génotypiques s'approcheront des idéotypes identifiés.

Cette approche nécessiterait d'analyser plus finement les causes et les effets des interactions G*E détectées par le modèle. En effet, les phénomènes d'interaction G*E sont considérés comme généralement faibles pour le riz pluvial (Ahmadi N., communication personnelle). Elles dépendront de l'étendue de la gamme de variétés et de sites environnementaux considérés par le programme de sélection. Il conviendra alors de s'assurer que les différentes situations soient bien incluses dans le domaine de validité du modèle.

5. CONCLUSION

Le modèle SAMARA s'est montré comme un bon outil de simulation de la croissance du riz pluvial. Son fonctionnement s'applique correctement à la gamme de variétés utilisées dans cette étude comprenant des représentants des principaux types variétaux cultivés. Les simulations ont été réalisées dans des environnements divers où la culture du riz pluvial est pratiquée. Son utilisation peut s'étendre à la grande diversité génétique du riz (estimée à 100.000 génotypes) et à la multitude des environnements concernés par la culture du riz pluvial. Mais l'intérêt le plus marquant de ce modèle réside dans sa capacité d'analyser l'effet des interactions entre les génotypes et les environnements sur les rendements.

C'est donc un outil particulièrement intéressant pour les programmes de sélection dont les objectifs sont le développement de variétés les mieux adaptées à leur milieu cultural. Les combinaisons optimales de paramètres génotypiques permettant de simuler les meilleurs rendements définissent des idéotypes susceptibles d'orienter les critères de sélection. De plus, la caractérisation des environnements et de leurs effets complexes sur la croissance du riz permet d'associer un idéotype à un groupe d'environnement particulier (Target Population of Environments). Cette association est susceptible d'aider à simplifier les schémas de sélection et d'en augmenter leur efficacité.

Ainsi, dans une première phase, la sélection assistée par le modèle peut être utilisée pour aider à la réalisation des étapes phénotypiques (expérimentale) de sélection variétale. Elle pourrait être par la suite appliquée à l'ensemble des processus d'amélioration en examinant tout d'abord sur des populations plus grandes la variabilité des paramètres génotypiques utilisés ou générés par le modèle, puis d'en étudier leur héritabilité au sens large et au sens strict. Il sera alors possible de mettre en place une approche intégrée de l'amélioration du riz prenant en compte la grande diversité génétique de cette plante, la multitude de ses environnements et la complexité des interactions G*E pour optimiser l'efficacité des programmes de sélection

Références bibliographiques

- AfricaRice (2010). *New Breeding Directions at AfricaRice : Beyond NERICA*. Africa Rice Center, Cotonou (Benin), 28 p.
- Arraudeau M. (1998). *Le riz irrigué (Tome 1). Le technicien d'agriculture tropicale*, Maisonneuve et Larose, Paris, 321 p.
- Baron C., Bonnal V., Dingkuhn M., Maraux F., Sarr M. (2003). SARRA-H: System for Regional Analysis and Agro-Climatic Risks. In: Struif Bontkes T., Wopereis, M. (ed) *Decision support tools for smallholder agriculture in Sub-Saharan Africa : A practical guide*. IFDC Muscle Shoals (USA), IX, 192-194.
- Boris J.P. (2010). *Main basse sur le riz*. Fayard, Paris, 219 p.
- Chapmann S., Cooper M., Podlich D. Hammer G. (2003). Evaluating Plant Breeding Strategies by Simulating Gene Action and Dryland Environments Effects. *Agron. J.*, 95: 99-113
- Charpentier H., Husson O., Andiatsilavo M., Chabaud C., Ravanomanan E., Michellon R., Moussa N., Rakotondralambo A., Séguy L. (2006). New Rice varieties and cropping systems for paddy fields with poor water control in Madagascar. *Congrès Mondial d'Agriculture de conservation*, Nairobi (Kenya), 3-7 Octobre 2005, FAO, Rome, 22-27
- Counce P.A., Gealy, D.R., Sung S.S. (2003). Rice Physiology. In: C. W. Smith and R. H. Dilday (ed) *Rice : Origin, History, Technology, and Production*. Wiley Series in Crop Science Texas A&M University (USA), 2.2. pp. 129-152
- Dingkuhn M., Luquet D., Quilot B., de Reffye P. (2006). Environmental and genetic control of morphogenesis in crops: towards models simulating phenotypic plasticity. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56, 1-14
- Guimaraes E.P., Chatel M. (2005). Exploiting Rice Genetic Resources through Population Improvement. In: *Population improvement: A way of exploiting the rice genetic resources of Latin America*. FAO, Rome, 3-17
- Greame L., Jordan H., Jordan D. (2009). An integrates systems approach to crop improvement. In: *Drought Frontiers in Rice: Crop Improvement for Increased Rainfed Production*. Serraj R., Bennett J., Hardy B. (ed). World Scientific, IRRI, 189-207
- Heinemann A.B., Dingkuhn M., Luquet D., Combres J.C., Chapmann S. (2008). Characterization of drought stress environments for upland rice and maize in central Brazil. *Euphytica*, **162 (3)**: 395-410
- Jacquot M., Courtois B. (1983). *Le riz pluvial. Le technicien d'agriculture tropicale* Maisonneuve et Larose, Paris, 134 p.
- Jacquot M., Clément G., Ghesquière A., Glaszmann J.C., (1997). Les riz. In : Charrier A., Jacquot M., Hamon S., Nicolas D. (ed) *L'Amélioration des plantes tropicales*. Repères, CIRAD et ORSTOM, Montpellier (France), 533-564
- Jennings P.R. (1964). Plant type as a rice breeding objective. *Crop Sci.* 4: 13-15.

- Jennings P.R., Coffman W.R., Kauffman H.E. (1979). Rice Improvement. International Rice Research Institute, Manila, Philippines
- Khush G.S. (1997). Origin, dispersal, cultivation and variation of rice. *Plant Mol. Biol.* 35, 25-374
- Luquet D., Dingkuhn M., Kim H.K., Tambour L, Clément-Vidal A. (2006). EcoMeristem, a model of morphogenesis and competition among sinks in rice: Concept, validation and sensitivity analysis. *Functional Plant Biology* (33), 309-323.
- Moldenhauer K.A., Gibbons J.H. (2003). Rice Morphology and Development. In: C. W. Smith and R. H. Dilday (ed) *Rice : Origin, History, Technology, and Production*. Wiley Series in Crop Science Texas A&M University (USA), 2.1. pp. 103-127
- Monteith J.L., Alvim P.T., Koslowski T.T. (1977). Climate. Ecophysiology of Tropical Crops. Academic Press, New York.
- Nemoto K., Morita S., Baba T. (1995). Shoot and root development in rice related to the phyllochron. *Crop Sci.* 35: 24-29
- Séguy L., Bouzinac S., Trentini A., (1997). Une révolution technologique : la culture du riz pluvial au Brésil. *International Rice Commission Newsletter*, 46: 45-61
- Tanaka A. (1965). Exemple of plant performance. In: The Mineral Nutrition of the Rice Plant, Proceedings of a Symposium at IRRI, Feb. 1964. Johns Hopkins University Press, Baltimore, pp. 37-49.
- Trébuil G, Hossain M. (2004). Le riz : enjeux écologiques et économiques. Collection Mappemonde, Belin, Paris, 265p.
- Vales M., Séguy L., Bouzinac S., Taillebois J.E., (2009). Improvement of cropping systems by integration of rice breeding : A novel genetic improvement strategy. *Euphytica*, 167(2), 161-164
- Vergara B.S., Chu T.M., Visperas R.M. (1970). Effect of temperature on the anthesis of IR8. *IRC Newsl.* 19(3):11-17
- Wallach D. (2006). Evaluating crop model. In: Wallach D., Makowski D., Jones J.W. (ed) *Working with Dynamic Crop Models : Evaluation, Analysis, Parameterization and Application*. Elsevier, Amsterdam, (2) 11-54.
- Wells B., Faw W.F. (1978). Short statured rice response to seedling and N rates. *Agron. J.* (70): 477-480
- Zeigler B.P., Praehofer H., Kim T.G. (1976). Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems. Academic Press (Second Edition). London (England), 510 p.

Sites internet :

UNCTAD (page consultée le 18/04/2010) : Evolution du marché du riz de 1961 à 2001. URL : <http://r0.unctad.org/infocomm/francais/riz/marche.htm>

IRRI (page consultée le 25/04/2010) : IRRI World Rice Statistics (WRS). URL : http://beta.irri.org/solutions/index.php?option=com_content&task=view&id=250

FAO (page consultée le 18/04/2010) : Feeding 4 billion people: the challenge for rice research in the twenty-first century. *GeoJournal*. Vol. 35. 1995. 388 pp. URL : <http://www.fao.org/docrep/v6017t/v6017t11.htm>

AfricaRice (page consultée le 10/06/2010). New Breeding Directions at AfricaRice : Beyond NERICA. URL: http://www.warda.cgiar.org/publications/Beyond_NERICA.pdf

CIAT (page consultée le 19/06/2010). Improved Rice. URL: http://webapp.ciat.cgiar.org/Improved_germplasm/rice.htm

ECOTROP (page consultée le 10/03/2010). Ecotrop Modelling Platform. URL: <http://ecotrop.cirad.fr/IMG/pdf/DocumentationScientifiqueModelesModulesPlateformeEcotropv31.pdf>

Illustrations :

Tableaux

Tableau 1 : Statistiques économiques mondiales du riz (FAOSTAT, 2008)

Tableau 2 : Description des variétés de riz utilisées pour le calibrage du modèle SAMARA

Tableau 3 : Valeurs des paramètres du modèle SAMARA pour huit variétés de riz cultivées en condition pluviale

Tableau 4 : Résultats des comparaisons, entre les données observées et simulées à l'aide du modèle SAMARA dans les conditions culturales de Sant-Rosa en 2007 et 2008

Tableau 5 : Résultats des simulations de la culture de sept variétés de riz pluvial sur quatre sites différents

Tableau 6 : Classement des sites en fonction de leur productivité

Tableau 7 : Classement des variétés en fonction de leur productivité

Tableau 8 : Etude de sensibilité du rendement simulé aux variations de différents paramètres génotypiques dans deux environnements culturaux de régimes hydriques contrastés

Figures

Figure 1 : les différents agro-écosystèmes rizicoles

Figure 2 : Fonctionnement d'une plante selon le modèle SAMARA

Figure 3 : Courbe d'évolution du coefficient de stress (Cstr) en fonction de la valeur de la fraction d'eau transpirable dans le sol (FTSW)

Figure 4 : Moyennes pluviométriques mensuelles à Santa-Rosa, Palmira, Goiania et Bouaké

Figure 5 : Simulation de la croissance de la variété ESPERANZA dans les conditions d'expérimentation de Santa-Rosa en 2006

Figure 6 : Valeurs observées pour différentes variables en fonction des valeurs simulées par le modèle SAMARA

Figure 7 : Résultats des simulations des rendements pour sept variétés dans quatre environnements

Figure 8 : Analyse en composante principale des variables de sortie du modèle à Santa-Rosa et à Palmira

Figure 9 : Courbes d'évolution du rendement en fonction de différents paramètres du modèle

Annexes

Annexe 1 : Liste et description des paramètres génotypiques du modèle SAMARA

Annexe 2 : Liste et description des variables de sortie du modèle SAMARA

Annexe 3 : Protocoles d'expérimentation

Annexe 1

Liste et description des paramètres cultureux du modèle SAMARA

Crop parameter variable	Functional group	Unit	Default	Value range	What does it do?
SDJLevee	Phenology	°C.d	50	0...infinite	Phase 1. Sets duration from sowing to germination (but may be overrode by drought)
SDJBVP	Phenology	°C.d	400	200...1000	Phase 2. Sets duration from germination to earliest possible PI (onset of BVP)
SDJRPR	Phenology	°C.d	400	200...600	Phase 4. Sets duration from PI to Flowering. Period of internode and panicle (structural component) development
SDJMatu1	Phenology	°C.d	400	200...600	Phase 5. Sets duration from flowering to end of grain filling. No more structural growth happens
SDJMatu2	Phenology	°C.d	50	0...300	Phase 6: Sets duration from end of grain filling to maturity/harvest date. No more growth but Assimilation & Rm continue, causing changes in internode reserves
Phyllo	Phenology	°C.d	50	20...80	Phyllochron (initial rate). Sets duration from one leaf appearance to the next. From internode elongation onwards phyllochron duration doubles
DEVcstr	Phenology	none	0	0...1	Stress brake on development rate. 0=no effect, 1 = reduction in development rate is proportional to cstr. Intermediate levels are non-linear, ex value 0.5 causes progressive brake as cstr decreases
PPExp	Photoperiodism	none	0.17	0.1...1	Attenuator for progressive PSP response to PP. Rarely used in calibration procedure, a robust value is 0.17
SeuilPP	Photoperiodism	h	13.5	14	Upper day length limit of PP response
PPSens	Photoperiodism	none	0.7	0.1...1	PP sensitivity, important variable. Range 0.3-0.6 is PP sensitive, sensitivity disappears towards values of 0.7 to 1. Described in Dingkuhn et al. 2008; Euro.J.Agron. (Impatience model)
PPCrit	Photoperiodism	h	11	10	Lower day length limit to PP response.
TBase	Thermal constant	°C	10	0...15	Base temperature (air based in this model; no microclimate simulated)
TOpt1	Thermal constant	°C	25	15...30	Lower limit of plateau of Thermal response of development
TOpt2	Thermal constant	°C	35	25...40	Upper limit of plateau of Thermal response of development
TLim	Thermal constant	°C	40	30...50	Upper thermal limit of development

TxConversion	CO2 Assimilation	g/MJ	4 (C3), 6 (C4)	2...8	Potential radiation use efficiency (RUE=epsilon-b) BEFORE maintenance. This value can be up to 2x higher than RUE found in literature, which is not assimilation but biomass based, and does not include the root system. Important parameter!
TxAssimBVP	CO2 Assimilation	fraction	1	0...1	Reduction factor to force lower assimilation during this phase
TxAssimMatu1	CO2 Assimilation	fraction	1	0...1	Reduction factor to force lower assimilation during this phase
TxAssimMatu2	CO2 Assimilation	fraction	0.5	0...1	Reduction factor to force lower assimilation during this phase
ASScstr	CO2 Assimilation	none	0.5	0...1	Attenuator of A as a function of cstr (simulating drought effect on T). Value 0 = A is insensitive to drought. Value 1 = reduction in A proportional to that of T. Intermediate values (ex. 0.5) cause a progressive response (TE increases as stomata close)
KRespMaintLeaf	Maint. Respiration	g/g	0.015	0.01...0.03	Daily dw loss to Rm at reference temperature 25°C (fraction of current dw). For the organ concerned
KRespMaintSheath	Maint. Respiration	g/g	0.01	0.005...0.02	Daily dw loss to Rm at reference temperature 25°C (fraction of current dw). For the organ concerned
KRespMaintRoot	Maint. Respiration	g/g	0.01	0.005...0.02	Daily dw loss to Rm at reference temperature 25°C (fraction of current dw). For the organ concerned
KRespInternode	Maint. Respiration	g/g	0.01	0.005...0.02	Daily dw loss to Rm at reference temperature 25°C (fraction of current dw). For the organ concerned
KRespPanicle	Maint. Respiration	g/g	0.01	0.005...0.02	Daily dw loss to Rm at reference temperature 25°C (fraction of current dw). For the organ concerned
CoefficientQ10	Maint. Respiration	none	1.5	1...2	Coefficient for Q10 rule for Rm. No effect at value 1, literature value of 2 doubles rate as T increases by 10°. Recent literature suggests value around 1.5
KcMax	Water relations	fraction	1.2	1...1.5	FAO reference coefficient for crop canopy ET as fraction of PET.
TxRuSurfGermin	Water relations	???	0.6	0.4...1	Sets topsoil relative water content necessary to enable germination
PFactor	Water relations	none	0.5	0...0.7	FAO reference for critical FTSW value for transpiration response. Value 0 = stomata respond immediately if FTSW<1. Most crops are around 0.5: response begins as half of available water is depleted. Rice is sensitive (value between 0.5 and 1)
SeuilCstrMortality	Water relations	d	10	0...30	Sets the cumulative, uninterrupted drought necessary to kill the plant (simulation ends). In days (... of FTSW<XXX, be checked)
Kdf	Light extinction	none	0.6	0.3...1	Sets extinction of incoming diffuse solar radiation by crop canopy as function of LAI. Value 0.4 = very erect leaves, 1 = horizontal leaves. Model corrects extinction as a function of clumping, leading to lower extinction (Kdfcl) at wide spacing
PoidsSecGrain	Seed properties	g	0.028	0.01-0.05	Dry weight of single seed (or filled grain) in g, or 1000-grain dry wt in

TxResGrain	Seed properties	fraction	0.5	0.4...0.8	kg. Fraction of seed weight mobilizable for growth of seedling
VRacLevee	Root growth	mm/d	25	0...50	Root front advance per day in mm, provided the wetting front or pre-set soil depth doesn't stop it. Is corrected by model for thermal time using the thermal constants of crop.
VRacBVP	Root growth	mm/d	20	0...50	same for BVP
VRacPSP	Root growth	mm/d	15	0...50	same for PSP
VRacRPR	Root growth	mm/d	5	0...50	same for reproductive phase
VRacMatu1	Root growth	mm/d	0	0...50	same for grain filling phase
VRacMatu2	Root growth	mm/d	0	0...50	same for terminal maturation phase
RootCstr	Root growth	none	0	0...1	Attenuator of root front advancement as function of cstr (drought). No effect at value 0, proportional effect at value 1. If used, value should be close to 0 (progressive response) because light stress does not impede root growth, sometimes stimulates it
CoeffRootMassPerVolMax	Root growth	kg/m ³ ??	0,0002	0.0001- 0.0005	Maximal root dry weight that can be produced per cubic meter of soil explored by root system. Sets demand for root partitioning, resulting values are always inferior
RootPartitMax	Root growth	g/g	0.5	0.3...0.8	Upper limit of daily incremental assimilate partitioned to roots. Value 0.5 is a good default value.
SlaMin	Leaf properties	kg/ha	0.0018	0.001...0.004	Final (minimal) value of SLA (leaf surface/dw) for bulk canopy
SlaMax	Leaf properties	kg/ha	0.0060	0.004...0.008	Initial (maximal) value of SLA (leaf surface/dw) for bulk canopy
AttenMitch	Leaf properties	none	0.9955	ca. 0.9955	Coefficient for Mitscherlich function leading to non linear evolution of SLA from max to min
InternodeLengthMax	Internode properties	mm	200	0...500	Maximal individual length of elongated internode (may not be attained if constraints)
LeafLengthMax	Leaf properties	mm	800	200...1200	Maximal individual length of the longest leaf blade (may not be attained if constraints)
CoeffLeafDeath	Leaf properties	fraction	0.03	0...0.06	Coefficient for leaf death sensitivity to resource restriction, function of Ic
rankLongestLeaf	Leaf properties	none	12	8...20	Position of longest leaf on main stem, usually between 10th and 15th
CoeffLeafWLRatio	Leaf properties	mm/mm	0.08	0.04...0.2	Maximal leaf blade width as fraction of length
RollingBase	Leaf properties	fraction	0.3	0.1...1	Leaf rolling under drought: relative leaf blade surface when fully rolled, as fraction of unfolded surface. By choosing value 1, leaf rolling does not happen at all
RollingSens	Leaf properties	none	0.1	ca. 0.1	Sensitivity of leaf rolling to drought (interactive term of atmospheric drought = PET and FTSW)
CoeffInternodeMass	Internode	g/mm	0.01	0...0.1	Maximal structural mass of internode per mm length

CoeffInternodeNum	properties Internode properties	none	1.5	1...3	If value is 1, only the number of internodes corresponding to the phyllochrons between onset elongation and flowering will elongate. Higher values of this para increase proportionnaly the number of elongating internodes
RelMobiliInternodeMax	Internode properties	fraction	0.2	0...1	Fraction of currently stored reserves in internodes that can be mobilized in one day, provided there is demand for it (Ic<1)
CoeffResCapacityInternode	Internode properties	fraction	1	0...2	Sets upper limit of internode storage capacity, as fraction of current structural internode mass. Value 2 enables storage capacity 2x of structural mass, tripling internode mass. With value=0 there is no storage
TilAbility	Tillering	fraction?	0.2	0...1	Sets capacity of plant to tiller if Ic > IcTillering. 0.3 gives already high tillering if conditions are favorable. Value 0 inhibits tillering totally
CoeffTillerDeath	Tillering	fraction	0.2	0...1	Sets rate of tiller abortion (as fraction of existing number) provided Ic falls below 0. Mass of aborted tillers is not lost but yield potential decreases because panicles disappear, and LAI growth is limited because less new leaves can be produced.
CoeffPanicleMass	Panicle properties	none	0.1	0...0.3	Sets growth rate of structural parts of panicle between PI and flowering, subject to limitation by ressource availability and genetic size limitation of panicle (PanStructMassMax). Most important parameter for harvest index & yield potential
PanStructMassMax	Panicle properties	g	3	0...10	Upper limit of individual panicle mass (structural parts only including peduncle). Multiplying this para with CoeffPanSinkPop gives potential panicle dw. Dividing this by PoidsSecGrain gives max number of grains per panicle.
CoeffPanSinkPop	Panicle properties	fraction	10	2...20	Sets the grain mass (yield) that can be produced per structural mass of panicle including peduncle. Should be species feature, ton't use it to calibrate for varieties
KCritSterCold1	Panicle properties	°C	15	0...20	Daily min temperature at pre-flowering below which there may be cold-induced sterility.
KCritSterCold2	Panicle properties	°C	10	0...20	Daily min temperature at which cold-induced sterility attains 100%
KCritSterHeat1	Panicle properties	°C	35	20...40	Daily Max temperature around flowering above which heat induces sterility
KCritSterHeat2	Panicle properties	°C	42	20...>40	Daily Max temperature around flowering above which heat induced sterility isd 100%

KCritSterFtsw1	Panicle properties	fraction	0.5	0...1	FTSW value around flowering below which drought induced sterility is observed
KCritSterFtsw2	Panicle properties	fraction	0.1	0...1	FTSW value around flowering below which drought induced sterility is 100%
CoeffClump	Light extinction	none	0.002	ca. 0.002	Coefficient translating canopy clumpiness into reduced light interception. Modify only if good reason
HaunCritTillering	Tillering	none	3	1...infinite	Leaf number on main culm above which tillering can happen. Usually 3 or 4
IcTillering	Tillering	none	0.5	0...1	Value of Ic below which tillering cannot happen because of resource restrictions. Modify with caution, tillering behaviour should be managed with Tilability and CoeffTillerDeath

Annexe 2

Liste et description des variables de sortie du modèle SAMARA

Name of output variable	Unit	Normal range	What does it mean?
<i>1. Most frequently used</i>			
Jour	d	na	calendar date dd/mm/yyyy
NbJas	d	na	days after sowing
NumPhase	none	0...7 (int.)	Phenological phase 1=germination, 2=basic vegetative phase, 3=photoperiod sensitive phase, 4=ripening phase, 5=maturation 1 (grain filling), 6=maturation 2 (grain drying), 7=stop simulation
DegresDuJour	°C.d	0...30	daily heat dose (in degree-days)
DegresDuJourCor	°C.d	0...30	same, but adjusted for drought effect using a value >0 for DEVcstr: drought slows development, thus reducing the effective heat dose available to plant for development
Lai	m ² /m ²	0...10	leaf area index (green leaf blades only)
Kdfcl	none	0...1	PAR extinction coefficient corrected for clumping (thus at times inferior to the parameter Kdf)
FTSW	none	0...1	fraction of transpirable soil water within the bulk root zone
Cstr	none	0...1	drought stress coefficient: FTSW is transformed into Cstr by FAO function using P-factor
RootFront	mm	0...3000	depth of root front
Eto	mm/d	0...10	potential evapotranspiration (FAO, also called PET, ETP or Eto). Approximates atmospheric demand for water vapor applied to a calm water surface (previously: wett short lawn).
ETM	mm/d	0...12	Maximal ET of crop taking into account crop Kc and current LAI
ETR	mm/d	0...12	Actual ET of crop taking into account crop Kc, current LAI and Cstr (causing drought induced stomatal closure)
RUE	g/MJ	1...4	radiation use efficiency as calculated from simulated aboveground dry matter and cumulative PAR intercepted; should be around 2 at end of crop cycle for C3 grass and 3-4 for C4 grass
Ic	g/g	0...>2	state variable "index of competition" = daily assimilate supply/demand. Supply = A - Rm (without reserves). Demand = potential new organ growth + demand for grain filling. Ic is used to calculate tillering, tiller & leaf senescence, and more
TilNumPlant	Tillers/plant	0...20	Tiller number per plant (without main stem)
TilNumPop	Tillers/ha	0...N *PopDens	Tiller number per ha (without main stem)
GrainYieldPop	kg/ha	0...12000	Grain yield at population scale (without structural parts of panicle)

2. Dry matter

DryMatStructLeafPop	kg/ha	0...5000	Green leaf blade dry matter at population scale
DryMatStructSheathPop	kg/ha	0...5000	Sheath blade dry matter at population scale
DryMatStructRootPop	kg/ha	0...5000	Root blade dry matter at population scale
DryMatStructInternodePop	kg/ha	0...15000	Internode blade dry matter at population scale (only structural component: reserves are simulated and output separately)
DryMatResInternodePop	kg/ha	0...10000	Internode reserve dry matter at population scale (without structural component: Internode total dry weight = DryMatStructInternodePop + DryMatResInternodePop)
DryMatStructPaniclePop	kg/ha	0...1500	Panicle structural dry matter at population scale (does not include grains), formed between PI and flowering
DryMatStructTotPop	kg/ha	0...20000	Total structural dry matter at population scale (excluding reserves and grains)
DryMatVegeTotPop	kg/ha	0...20000	Total vegetative dry matter at population scale (does not include panicles and grains)
DryMatPanicleTotPop	kg/ha	0...12000	Total panicle dry matter at population scale (includes structural parts and grains)
DryMatAboveGroundPop	kg/ha	0...32000	Total aboveground dry matter at population scale
DryMatTotPop	kg/ha	0...35000	Total plant dry matter at population scale including roots

3. Yield components

SterilityCold	fraction	0...1	Spikelet sterility due to low temperatures during microspore stage (ca booting stage) based on daily Tmin during sensitive period
SterilityHeat	fraction	0...1	Spikelet sterility due to high temperatures during heading/flowering stage based on daily Tmax during sensitive period
SterilityDrought	fraction	0...1	Spikelet sterility due to drought (as indicated by FTSW) during heading/flowering stage
SterilityTot	fraction	0...1	Total spikelet sterility (caused by cold, heat and drought)
HarvestIndex	fraction	0...0.6	harvest index = grain yield / aboveground dry matter
PanicleNumPop	Panicles/ha	0...N*PopDens	Number of panicles per ha
PanicleNumPlant	Panicles/plant	0...20	Number of panicles per plant = number of surviving tillers, considered fertile
GrainYieldPanicle	g/panicle	0...15	grain yield per panicle
SpikeNumPop	Spikelets/ha	0...5E8	spikelet number per ha (= potential grain number per ha)
SpikeNumPanicle	spikelets/panicle	0...500	spikelet number per panicle (=potential grain number per panicle)
FertSpikeNumPop	spikelets/ha	0...5E8	fertile spikelet number per ha (those that are not sterile due to heat, cold or drought)
GrainFillingStatus	g/g	0...1	Degree of realization of filling of fertile spikelets. If <1, this may mean that grain weight is < potential (set by seed weight), or some spikelets remain unfilled (false sterility). Values < 1 indicate source limitation during filling.

4. Morphological variables

PhaseStemElongation	none	0 or 1	Indicates whether internodes are elongating (1) or not (0)
Sla	ha/kg	0.001..0.008	Specific leaf area (reciprocal of specific leaf weight). High values indicate thin leaves
HaunIndex	none	0...40	Number of leaves appeared on main stem, including those that have already senesced
ApexHeight	mm	0...4000	Height of growing point over ground (excluding the panicle and its peduncle)
PlantHeight	mm	0...5000	Overall height of plant including top leaves, assuming vertical orientation
PlantWidth	mm	0...1500	Approximate plant width
VitesseRacinaireDay	mm/d	0...35	current progression rate of root front
TillerDeathPop	Tillers/day/ha	0...	Daily number of senesced tillers per ha
PlantLeafNumTot	Leaves/plant	0...100	Total number of leaves produced by plant, including green and dead
DeadLeafdrywtPop	kg/ha	0...5000	Dead leaf dry mass (assuming they do not decompose; but excluding the mass that has been recycled)
LaiDead	m ² /m ²	0...10	Dead leaf area index, assuming they don't shrink nor decompose
ResCapacityInternodePop	kg/ha	0...15000	Size of potential reservoir for reserves in internodes per ha
InternodeResStatus	fraction	0...1	Current level of filling of internode reserve reservoir
ResInternodeMobiliDay	kg/ha	0...	Daily rate of internode reserve mobilization
RelPotLeafLength	fraction	0...1	Relative length of leaf blades currently developing, or the last one that developed, on a 0...1 scale. 1=potential relative length of longest leaf
RootShootRatio	fraction	0...1	Dry mass ratio of root over aboveground organs

5. Interception & assimilation

Kcl	none	0...	coefficient of clumping
KRolling	fraction	0...1	current rolling status of leaf rolling due to drought, expressed as fraction of visible rolled surface / potential expanded surface
LIRkdfcl	fraction	0...1	Light interception rate of canopy as calculated with Kdfcl (taking into account crop Kdf and clumping)
LTRkdfcl	fraction	0...1	Light transmission rate of canopy as calculated with Kdfcl (taking into account crop Kdf and clumping), = 1-LIRkdfcl
AssimPot	kg/ha/d	0...800	Canopy CH ₂ O assimilation per day BEFORE reduction by stomatal closure (mediated by Cstr) and subtraction of Rm
Assim	kg/ha/d	0...800	Assim=AssimPot * Cstr (if applicable, corrected with CstrAssim)
RespMaintTot	kg/ha/d	0...600	Total daily maintenance respiration (Rm), sum of that of all organs as calculated with organ specific coefficients
SupplyTot	kg/ha/d	0...600	Net fresh assimilate supply per day = Assim-RespMaintTot

AssimSurplus	kg/ha/d	0...300	Daily assimilate surplus after allocation to structural growth and grain filling. This surplus goes into internode storage, and if that compartment is saturated, will be declared as "not used".
AssimNotUsed	kg/ha/d	0...200	This assimilate is not used because all sinks and the reserve buffer are saturated. It does not appear as dry matter and can be considered disappearing as feedback inhibition of A or luxury respiration
AssimNotUsedCum	kg/ha	0...10000	Accrued term of AssimNotUsed
IcMean	none	0...2	Accrued mean of Ic
RespMaintDebt	kg/ha	0...400	Rm demand that cannot be satisfied with current supply is shifted as a debt to the next day, where it is included in that day's accrued demand for assimilate. The logic is that failure to respire does not kill plant but reduces subsequent growth.
<u>6. Microclimate & water</u>			
DayLength	h	10...14	day length including civil twilight
Par	MJ/d/m ²	0...15	Photosynthetically active radiation (PAR), which is about 50% of incoming global solar radiation
RgCalc	MJ/d/m ²	0...30	Solar global radiation as calculated from sunshine hours, calendar date and latitude for cases of unavailability of direct measurements of Rg
VDPCalc	Kpa	0...10	Vapor Pressure Deficit (VPD) calculated from relative humidity and temperature
TMoyCalc	°C	0...35	Mean of Tmin and Tmax
HMoyCalc	%	0...100	Mean of min and max humidity
StockTotal	mm	0...50	Total water column stored in soil profile
EauDispo	mm	0...50	Total available water column stored in soil profile
StockSurface	mm	0...10	Water column stored in topsoil layer
StockRac	mm	0...50	Water column stored in soil volume explored by root system
RURac	mm	0...50	Water column that can potentially be stored in soil volume explored by root system
Kcp	fraction	0...1.5	Partial Kc (simulated current crop coefficient ETR/Eto) attributable to plant transpiration
Kce	fraction	0...1	Partial Kc (simulated current crop coefficient ETR/Eto) attributable to soil evaporation
EvapPot	mm/d	0...10	Potential soilsurface evaporation (taking into account effect of ground cover) assuming soil is saturated
Evap	mm/d	0...10	Actual soil surface evaporation under crop (if any is present)
TrPot	mm/d	0...15	Potential crop transpiration taking into account LAI and drought level (cstr)
Tr	mm/d	0...15	Actual crop transpiration
Lr	mm/d	0...100	Runoff

Dr	mm/d	0...40	Deep drainage
ParIntercepte	MJ/d/m ²	0...15	PAR intercepted by crop
Kc	fraction	0...1.5	Simulated crop coefficient Kc (Evaptranspiration / Eto) taking into account ground cover and water relations of soil and plant
RayExtra	MJ/d/m ²	0...50	Extra-terrestrial solar radiation
TMinMoy	°C	0...30	Mean Tmin observed during critical period for cold induced spikelet sterility
TMaxMoy	°C	0...45	Mean Tmax observed during critical period for heat induced spikelet sterility
FtswMoy	fraction	0...1	Mean FTSW observed during critical period for drought induced spikelet sterility

Annexe 3

PROTOCOLES D'EXPERIMENTATION

CAMPAGNE D'EXPERIMENTATION 2006

Localisation : Station expérimentale du CIAT à Santa-Rosa (Colombie)

Date de semis : 21/04/2006

Matériel végétal :

- 10 variétés d'origines et de caractéristiques variées
- Parmi ces variétés, 6 variétés ont été choisies pour tester le modèle SAMARA : CICA 8, CIRAD 409, ESPERANZA, FEDEARROZ 50, PCT-4\SA\1\1>975-M (PCT 975, ORYZICA SABANA 6, SQUAREMA et WAB 77597-2-2-HB-2 (WAB 77 597)

Dispositif expérimental :

- Dispositif en blocs randomisés à 4 répétitions
- Surface parcellaire élémentaire de 15 m², semis en poquets 0,20 x 0,20 m
- Démariage à 1 plant par poquet

Protocoles de mesures :

- | | | |
|---|---|-------------------------|
| - Nombre de talles | } | sur 5 plantes au hasard |
| - Nombre de panicules | | |
| - Poids de matière sèche aérienne (g) | | |
| - Surface foliaire au planimètre (cm ²) | | |
| - LAI et SLA | } | sur 1 plante |
| - Poids de matière sèche racinaire (g) | | |
| - Hauteur (tige + feuille la plus longue) | } | moyenne de 5 mesures |
| - Longueur des feuilles | | |
| - Largeur des feuilles | | |
| - Floraison | | 50% des épis sortis |

Procédure de récolte :

- | | | |
|--|---|------------------|
| - Poids de grains (g) : pesée de la parcelle élémentaire | } | sur 10 panicules |
| - Humidité du grain (%) | | |
| - Stérilité (%) | | |
| - Poids de 100 grains | | |

CAMPAGNE D'EXPERIMENTATION 2007-2008

Localisation : Station expérimentale du CIAT à Santa-Rosa (Colombie)

Date de semis : 9/10/2007 en contre-saison

Matériel végétal :

- 60 variétés d'origines et de caractéristiques variées
- 4 variétés témoins (ESPERANZA, FEDEARROZ 50, IRAT 216 et SAQUAREMA)
- Parmi ces variétés, 6 variétés sont communes avec l'essai 2006 dont 3 témoins (ESPERANZA, FEDEARROZ 50, SAQUAREMA) et 3 variétés en test (CICA 8, CIRAD 409, ORYZICA SABANA 6).

Traitements « stress hydrique » : Irrigué (NS) et non irrigué (SS)

Dispositif expérimental :

- Dispositif à témoins répétés (4 fois)
- Surface parcellaire élémentaire de 2m x2m (4 m²), écartement entre les lignes de 0,20 m

Protocoles de mesures :

- | | | |
|---|---|-------------------------|
| - Nombre de talles | } | sur 5 plantes au hasard |
| - Nombre de panicules | | |
| - Poids de matière sèche aérienne (g) | } | sur 1 plante |
| - Poids de matière sèche racinaire (g) | | |
| - Hauteur (tige + feuille la plus longue) | } | moyenne de 5 mesures |
| - Longueur des feuilles | | |
| - Largeur des feuilles | | |
| - Floraison | | 50% des épis sortis |

Procédure de récolte :

- | | | |
|--|---|-----------------|
| - Poids de grains (g) : pesée de la parcelle élémentaire | } | sur 5 panicules |
| - Humidité du grain (%) | | |
| - Stérilité (%) | | |
| - Poids de 100 grains | | |

CAMPAGNE D'EXPERIMENTATION 2008-2009

Localisation : Station expérimentale du CIAT à Santa-Rosa (Colombie)

Date de semis : 12/11/2008 en contre-saison

Matériel végétal :

- 386 génotypes issus des populations améliorées PCT-4 et PCT-11
- 6 cultivars témoins (BALA, CURINGA, MARAVHILLA, MOROBEREKAN, ORYZICA SABANA 6, SEBOTA)

Traitements « stress hydrique » : Irrigué (NS) et non irrigué (SS)

Dispositif expérimental :

- Dispositif à témoins répétés (16 fois)
- Surface parcellaire élémentaire de 2 lignes de 3 m, écartement entre les lignes de 0,20 m