

RIDEV : un modèle de développement du riz pour le choix des variétés et des calendriers

□ □ □

M. Dingkuhn*, P. Y. Le Gal**, J. C. Poussin***

* Agro-physiologiste, ADRAO, Saint-Louis

** Agronome, CIRAD-SAR, Montpellier

*** Agronome, ORSTOM, Dakar

Depuis la mise en service des barrages de Diama en 1986 et Manantali en 1990, la double riziculture, composante de l'intensification des systèmes de production irrigués dans la vallée du fleuve Sénégal, est devenue possible. Compte tenu des conditions climatiques et du matériel végétal disponible, cette double culture comprend une campagne de saison sèche chaude, semée en février-mars, qui doit être récoltée en juillet afin de pouvoir démarrer une campagne d'hivernage avant septembre.

Pour choisir un couple "variété - date de semis", les agriculteurs doivent évaluer la longueur de cycle et le taux de stérilité florale probable. Ce raisonnement s'effectue en terme de risque à partir d'une analyse de la fréquence des paramètres climatiques. Ces éléments orientent également les recherches en amélioration variétale pour donner plus de souplesse au calage des cycles culturaux.

En riziculture irriguée intensive, l'amélioration des rendements et le développement de la double culture annuelle dépendent en partie des réponses données à ces problèmes.

La démarche classiquement utilisée se base sur la mise en place d'essais "variétés - dates de semis", répétés dans l'espace et le temps. Les mesures sur le rendement et la longueur des cycles respectifs des variétés testées, débouchent sur des recommandations aux paysans, du type :

- "Jaya est une variété de 120 jours en hivernage. "

- "Jaya ne doit pas être semée au delà du 4 septembre. "

Cette méthode, par son caractère descriptif et non explicatif, présente de nombreux désavantages par rapport à un objectif d'aide à la décision. En effet, les résultats obtenus sont difficilement extrapolables hors des sites, dates et années d'expérimentation, ce qui oblige à multiplier les situations. Le coût d'une telle approche peut alors fortement augmenter. Par ailleurs le

caractère normatif de ce type de recommandations interdit d'évaluer les risques inter- et intra-annuels liés à des choix particuliers d'agriculteurs, d'autant plus que l'appréciation du risque est un élément fortement dépendant de l'individu ou du groupe d'individus (Munier, 1989).

L'utilisation des modèles offre une voie différente et semble mieux adaptée à la résolution des problèmes posés. Un modèle est un mode de représentation de mécanismes, ici biophysique, dont la structure une fois validée est utilisable dans des situations variées, sans qu'il soit nécessaire de répéter les observations à l'origine de son élaboration. La construction du modèle nécessite cependant une compréhension des mécanismes en jeu, par exemple des relations entre climat et longueur de cycle, puis leur traduction mathématique et informatique. Enfin, la réalisation d'un outil informatique utilisable par les agriculteurs ou leurs conseillers, nécessite la création d'une interface permettant une mise en relation entre les connaissances de l'utilisateur et celles manipulées par le modèle.

Cet article présente comment cette démarche a été appliquée aux rythmes de développement du riz en zone sahélienne. Nous présenterons successivement les bases agro-physiologiques du modèle utilisé, la structure informatique de l'outil d'aide à la décision, et deux exemples d'applications déjà testées ou envisagées.

BASES AGRO-PHYSIOLOGIQUES DU MODÈLE

La description détaillée des bases agro-physiologiques du modèle faisant l'objet d'autres communications (Dingkuhn *et al.*, 1994 ; Dingkuhn & Miézan, 1994 ; Dingkuhn, 1994), nous nous limiterons ici à une présentation succincte.

L'analyse des variations saisonnières et variétales de la durée du cycle du riz irrigué est fondée sur trois expérimentations de type "rice garden". Un rice garden (Alocija *et al.*, 1981) est un système de culture continue de riz avec des dates de semis réparties au long de l'année.

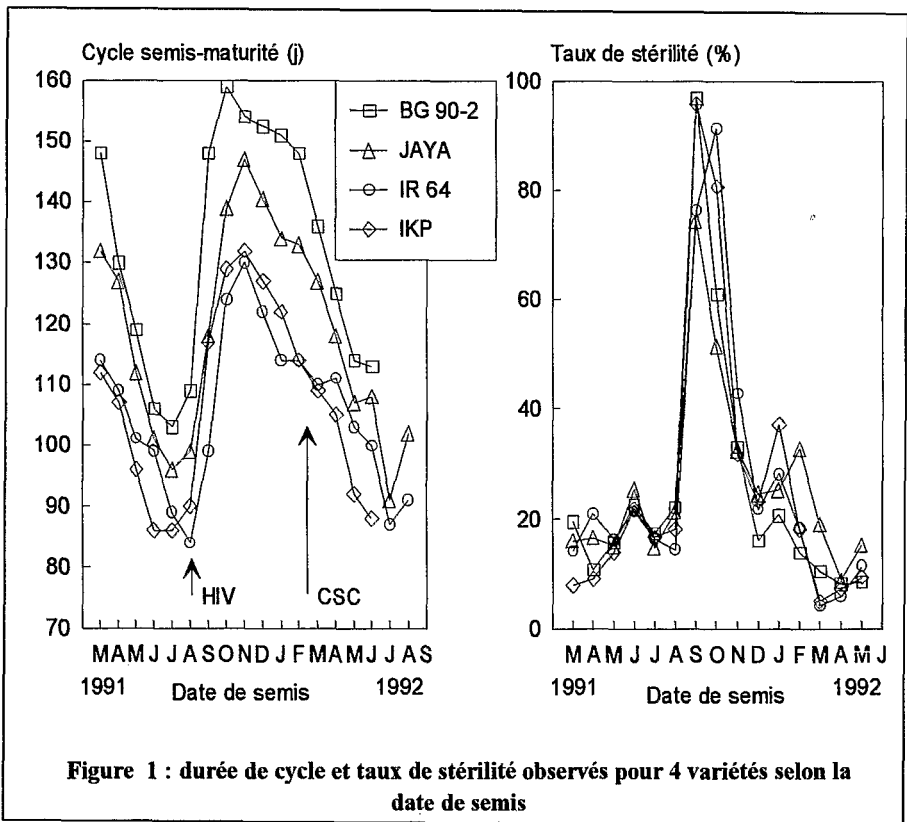
Méthode de travail

Nos deux expérimentations principales, conduites depuis 1990 sur les sites de Ndiaye (dans le delta) et Fanaye (dans la moyenne vallée), ont porté sur 12 dates de semis et 7 variétés avec 2 répétitions. Pour chaque parcelle, on relève les dates de semis, repiquage, épiaison, floraison et maturité physiologique, ainsi que les rendements en grains et en pailles. Des mesures mensuelles de biomasse aérienne sont également réalisées. Une station météorologique automatique, installée dans chaque site, permet de collecter d'heure en heure les températures de l'air, de l'eau et du sol, ainsi que la radiation solaire. De plus, des observations micro-météorologiques sont effectuées quotidiennement par la SAED à Ndiaye et l'ISRA à Fanaye.

Les résultats obtenus à Ndiaye ont été utilisés pour la construction du modèle physiologique de développement du riz. Ceux de Fanaye ont été utilisés pour la validation. Une troisième expérimentation, plus légère mais portant sur 49 génotypes a été mise en place afin de calibrer une large gamme de variétés, notamment celles couramment utilisées dans la région du fleuve Sénégal (jaya, IKP, aïwu, BG90-2, IR1529, IR8, KH998, SIPI6920) et quelques nouvelles sélections, dont certaines font actuellement l'objet d'essais sur différents sites en collaboration avec l'ISRA et le Projet Autonome Semencier (PAS).

Mécanismes physiologiques en jeu

Variation de la durée du cycle



Le phénomène à expliquer est illustré par la figure 1 : la durée semis-floraison varie de plus de 60 jours selon la date d'implantation ; les semis d'octobre à novembre conduisent aux durées les plus longues, ceux de juin à août aux durées les plus courtes.

Le cycle du riz est analysé en trois phases : la phase végétative, la phase reproductive et la maturation. Leur durée est régulée par divers mécanismes physiologiques qui sont sous contrôle génétique.

Pendant la phase végétative le développement se limite à l'apparition des feuilles, et la plante est insensible à la photopériode (Vergera & Chang, 1985). Le repiquage induit un stress qui allonge la durée de la phase végétative de 8 à 12 jours selon la saison.

A la fin de cette première phase (BVP), la plante devient sensible à la photopériode (PP). L'entrée en phase reproductive est favorisée par une durée du jour courte (11 heures environ). La sensibilité à PP est fonction de la variété ; la plupart de celles connues dans la région du fleuve (aiwu et jaya par exemple) sont moyennement sensibles : elles entrent en phase reproductive même si PP est supérieure à 12 heures, mais la floraison est retardée de 5 à 15 jours.

Durant tous les stades de développement, la température influe sur la vitesse de développement (DR). En dessous d'une certaine température (T_{base}) le développement s'arrête ; au dessus de T_{base} , DR augmente linéairement avec la température jusqu'à une température optimale (T_{opt}) (Summerfield *et al.*, 1992) après laquelle DR reste constant ou peut diminuer. Une certaine somme de degrés - jour (Tsum) est nécessaire pour atteindre la floraison. Tsum varie selon la variété entre 500 et 1.500°-jour (seules les températures comprises entre T_{base} et T_{opt} sont comptées).

Photopériodisme et température peuvent interagir de façon complexe (Summerfield *et al.*, 1992). Nous avons choisi un modèle simplifié rendant compte de ces interactions : PP influe sur la valeur de Tsum, ce qui modifie la date de la floraison.

La durée entre floraison et maturité (m) est indépendante de la photopériode, varie légèrement selon la variété, et dépend de la température (Yoshida, 1981 ; Penning de Vries *et al.*, 1989). Selon nos expérimentations, m se situe autour de 28 jours en hivernage, mais peut dépasser 45 jours en saison froide ; les températures supérieures à 28°C n'accélèrent pas la maturation (Dingkuhn, travaux en cours).

Relations entre température de l'air, de l'eau et développement

Le point de croissance du riz irrigué est submergé jusqu'à la montaison ; il est par conséquent exposé à la température de l'eau.

La température de l'eau dépend de nombreux facteurs : vitesse du vent, humidité de l'air, rayonnement et amplitude de la variation de température de l'air entre le jour et la nuit (Dingkuhn, 1992). La température de l'eau dépend également de l'importance du couvert végétal : lorsque LAI est faible (en début de cycle), la température de l'eau en début d'après-midi est légèrement plus

haute que celle de l'air ; quand LAI est supérieur à 4 (tallage-montaison), la température de l'eau peut être 10°C en dessous de celle de l'air.

Effet des températures sur la stérilité des épillets

Le développement des organes floraux du riz est extrêmement sensible aux basses températures : des températures nocturnes inférieures à 18°C interrompent le processus de méiose dans les organes mâles et provoquent une stérilité des épillets (Nishimaya, 1984). La figure 1 illustre ce phénomène : le taux de stérilité fluctue entre 10 et 25% dans la plupart des situations, mais croît très fortement jusqu'à 100% lorsque le riz est implanté entre fin septembre et début novembre.

La stérilité due aux températures élevées, moins grave que la précédente, apparaît principalement durant la saison sèche chaude. Une corrélation significative a été trouvée entre stérilité et température à l'épiaison (ADRAO, 1993).

Modèle de simulation de la durée du cycle et de la stérilité

Un modèle complet rendant compte de l'ensemble des phénomènes physiologiques et micro-climatiques décrits précédemment a été élaboré. Le modèle présenté ici en constitue une version simplifiée. Les données en entrées sont les paramètres variétaux, les températures de l'air journalières ($T_{\min_{\text{air}}}$ et $T_{\max_{\text{air}}}$) ainsi que la latitude du site, nécessaire au calcul de la photopériode.

Température de l'eau et cumul des températures

La température de l'eau dépend de l'écart entre T_{\min} et T_{\max} de l'air et du stade de la culture :

$$T_{\min_{\text{eau}}} = T_{\min_{\text{air}}}$$

$$T_{\max_{\text{eau}}} = T_{\max_{\text{air}}} - f(T_{\max_{\text{air}}} - T_{\min_{\text{air}}}, \text{stade})$$

$$T_{\text{moy}_{\text{eau}}} = (T_{\max_{\text{eau}}} + T_{\min_{\text{eau}}})/2$$

Le cumul des températures s'effectue en ne tenant compte que de celles qui sont comprises entre T_{base} et T_{opt} :

si $T_{\min_{\text{eau}}} > T_{\text{base}}$ et $T_{\max_{\text{eau}}} < T_{\text{opt}}$, le cumul porte sur $T_{\text{moy}_{\text{eau}}}$, sinon on introduit un terme correctif.

Durée du cycle

L'influence du repiquage et de la photopériode se traduisent par une correction de la somme de température nécessaire pour atteindre la floraison (T_{sum}).

Du semis à la floraison on effectue le cumul des températures journalières de l'eau, jusqu'à atteindre T_{sum} .

A partir de la floraison, la température de l'air influe sur le développement de la culture. Les températures supérieures à 28°C n'accélèrent pas la maturité, et la progression journalière vers la maturité, notée $1/m$, est calculée ainsi :

$$1/m = (0,5 * 2^{(T_{moy}/10)}) / 10$$

$$\text{avec } T_{moy} = \text{MIN}(28^{\circ}\text{C}, (T_{\text{max,air}} + T_{\text{min,air}})/2)$$

On cumule alors des valeurs quotidiennes de $1/m$ jusqu'à atteindre la valeur 1 (m correspond à la durée floraison-maturité).

Taux de stérilité

A partir du stade montaison (85% de T_{sum}) et jusqu'à la floraison, on cumule les températures minimales. Si la moyenne de ces températures pendant cette phase (t_{moy_f}) est inférieure à 20°C, le taux de stérilité due au froid est donné par la régression :

$$\text{ster_f} = 500 - 25 * t_{moy_f}$$

Pour la stérilité due à la chaleur, on cumule les températures moyennes entre épiaison et 15% de m . Soit t_{moy_c} la moyenne des températures pendant cette phase ; le taux de stérilité due à la chaleur est donné par la régression :

$$\text{ster_c} = 47.4 - 5.28 * t_{moy_c} + 0.145 * t_{moy_c}^2$$

Calage du modèle et validation

Le calage du modèle a été réalisé pour 49 variétés et 13 dates de semis à la station de Ndiaye dans le delta du Sénégal (ADRAO, 1994). La détermination des constantes photothermiques a été effectuée, à l'aide d'un programme spécifique, en minimisant les écarts à la régression entre durée du cycle et stérilités simulées, et les observations (Dingkuhn & Miézan, 1994).

Pour 28 variétés, la validation a été effectuée en utilisant des observations issus d'autres dispositifs expérimentaux : les résultats du dispositif ADRAO à la station de Fanaye dans la moyenne vallée du Sénégal, ceux du projet RE-TAIL à Niono (Mali), et ceux obtenus par l'IRRI. Pour les autres, aucune référence indépendante n'a pu être obtenue. Des références supplémentaires, utilisables pour la validation du modèle et son extension à d'autres variétés, seront disponibles en 1994-95 grâce aux travaux que réalise l'ADRAO au Mali et au Burkina Faso en collaboration avec les programmes de recherche nationaux.

STRUCTURE DE L'OUTIL D'AIDE A LA DÉCISION

Le modèle décrit précédemment a été traduit en langage informatique. Ce programme, écrit en BASIC, est utilisé par les chercheurs pour répondre à des besoins de validation et de calibrage.

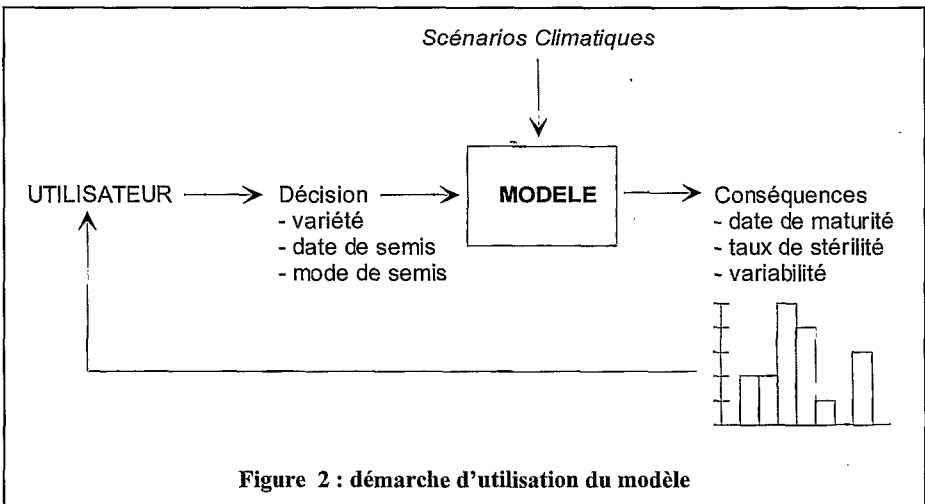
L'utilisation de ce modèle dans une perspective d'aide à la décision d'agriculteurs a nécessité la conception d'une démarche d'utilisation et d'une interface adaptée.

Démarche d'utilisation du modèle

Quels choix aider et comment aider ces choix ? Il s'agit ici de la date de semis et de la variété. L'aide au choix consiste à montrer à travers des simulations, les conséquences de ces choix en terme de durée de cycle et de date de maturité (et de récolte) d'une part, de taux de stérilité et de pertes de rendement d'autre part. Le choix du mode de semis (semis direct ou repiquage) fait intervenir d'autres considérations que la durée du cycle de la culture, disponibilité de main d'oeuvre et maîtrise de l'enherbement notamment, qui ne sont pas pris en compte dans le modèle. Le mode de semis n'est pris en compte dans le modèle que pour son effet sur la durée du cycle de la culture et indirectement sur le taux de stérilité.

Durée du cycle et stérilité sont dépendantes des conditions climatiques de l'année. Or, dans la réalité, la décision de semis s'effectue sans connaissance du climat à venir. La simulation permet cependant de tester les conséquences de cette décision face à différents scénarios climatiques correspondant aux enregistrements météorologiques des années passées. Le choix de simuler une large gamme de scénarios vise alors à mesurer l'effet de la variabilité climatique inter-annuelle sur celle des résultats. On peut également envisager de tester les conséquences de certains scénarios climatiques types : démarrage tardif de la saison chaude, températures très élevées en juin, etc.

L'utilisateur peut ensuite, en observant les résultats obtenus par simulation, modifier ses choix (date et mode de semis, variété semée), et tester l'impact de ces modifications. La figure 2 illustre cette démarche d'utilisation.



Interface entrées / sorties

Afin d'améliorer le caractère convivial de l'outil, nous avons conçu un module d'entrée très simple et un module de sortie permettant différents modes de représentation des résultats.

En entrée (Figure 3), l'utilisateur choisit la variété dans une liste de 49 variétés ; à cette liste est associé un fichier contenant tous les paramètres variétaux nécessaires au fonctionnement du modèle. Le mode de semis peut avoir deux modalités : semis direct ou repiquage ; le choix de la modalité s'effectue également dans une liste. La date de semis est saisie sous la forme jour / mois (ex : 15/2). Les données climatiques journalières Tmin et Tmax ainsi que la latitude de la station météorologique sont stockées dans un fichier.

The screenshot shows a graphical user interface for the 'SEMIS' (Sowing) module. It consists of several nested windows:

- SEMIS** (outermost window):
 - Variété semée: **AIWU**
 - Mode de semis: **DIRECT**
 - Date de semis: **07/03**
- FICHER METEO** (middle window):
 - C: \PODOR.TEM
- VARIETE** (innermost window, overlapping the file list):

| | | | | | |
|------|------|------|------|------|------------|
| 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | AIWU |
| 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | B5322 |
| 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | BOUAKE 189 |
| 1986 | 1987 | | | | CHINA 998 |
| | | | | | IKP |
| | | | | | IR13240 |

Figure 3 : module d'entrée

Après saisie du nom de ce fichier, le programme affiche les années enregistrées ; l'utilisateur sélectionne alors celles qui serviront de scénarios climatiques puis lance la simulation.

La simulation dure quelques dixièmes de seconde par scénario, grâce à l'utilisation d'un langage informatique compilé (langage C).

En sortie, trois modes de représentation des résultats sont possibles (Figure 4) :

Variété : AIWU

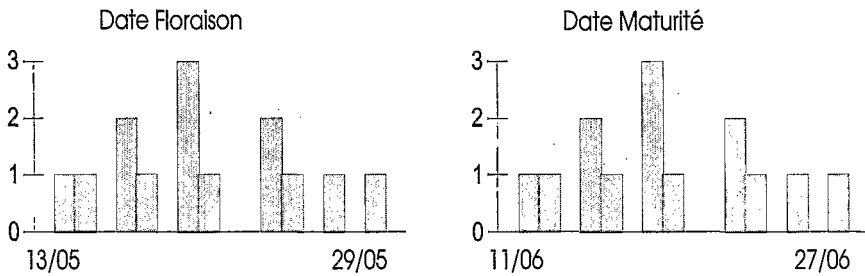
Mode de semis : DIRECT

Date de semis : 07/03

Présentation des résultats sous forme d'un tableau

| Année | Dates | | Durées en jours | | | Stérilité | | |
|-----------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | Flo | Mat | S-Flo | F-Mat | S-Mat | Froid | Chaud | Total |
| 1967 | 25/05 | 23/06 | 79 | 29 | 108 | 0.0 | 22.9 | 22.9 |
| ... / ... | | | | | | | | |
| 1980 | 14/05 | 12/06 | 68 | 29 | 97 | 0.0 | 32.7 | 32.7 |
| Mini | 13/05 | 11/06 | 68 | 29 | 97 | 0.0 | 11.3 | 15.8 |
| Maxi | 29/05 | 27/06 | 84 | 29 | 113 | 13.2 | 38.5 | 38.5 |
| Moy. | 20/05 | 18/06 | 75 | 29 | 104 | 1.6 | 26.1 | 27.7 |
| C. V. | | | 6.3 | 0.0 | 4.6 | 250.7 | 29.3 | 23.1 |

Présentation des résultats sous forme d'histogrammes



Présentation des résultats sous forme de diagrammes de Gantt

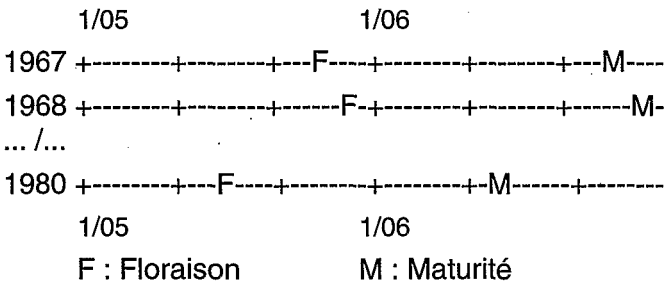


Figure 4 : présentation des résultats de la simulation

- 1) un tableau donnant pour chaque scénario les dates de floraison et de maturité, les durées semis-floraison, floraison-maturité et semis-maturité, ainsi que les taux de stérilité. Dans les dernières lignes du tableau, on trouve pour chaque colonne, moyenne, minimum, maximum et coefficient de variation.
- 2) distribution des résultats sous forme d'histogramme pour les dates des stades, les durées et les taux de stérilité.
- 3) calendrier cultural (dates de floraison et de maturité) sous forme d'un diagramme de Gantt pour chacun des scénarios simulés.

EXEMPLES D'APPLICATIONS

La double riziculture

Le modèle a été utilisé avec les agriculteurs des aménagements de Ntiagar et Ndiawara, où la double riziculture annuelle s'est développée depuis un à deux ans. Celle-ci comprend une campagne de saison sèche chaude, avec un semis en février-mars et une récolte en juillet, suivie d'une campagne d'hivernage avec un semis en juillet-août et une récolte effectuée habituellement en décembre-janvier. Début et fin de campagne sont liés par le rythme de développement du riz, et deux goulots d'étranglement apparaissent lors de l'enchaînement des campagnes (récolte-semis), en juillet-août et janvier-février.

Les agriculteurs, auxquels incombe aujourd'hui la gestion des aménagements hydro-agricoles, font face à plusieurs questions chronologiquement liées :

- comment choisir les variétés et dates de semis ?
- quand vidanger les parcelles avant récolte ?
- comment organiser les chantiers de récolte et de préparation du sol ?

Le modèle de développement du riz présenté ici permet de traiter la première question. La démarche de conseil adoptée cherche à stimuler la réflexion des agriculteurs autour des problèmes soulevés et de leur situation propre, plutôt qu'à leur apporter des solutions standards (Le Gal, 1993). Les interlocuteurs peuvent être des groupes, généralement de responsables, sur les aménagements collectifs, ou des chefs d'exploitation sur les aménagements privés qui tendent à se multiplier dans la vallée. L'utilisation du modèle permet d'aborder avec les agriculteurs quatre thèmes importants pour la gestion des calendriers de travaux.

Évaluation du risque climatique

Si la variation inter-annuelle des températures est relativement faible durant la saison des pluies, il en va différemment durant la saison sèche. Pour une même variété et un même site, la longueur du cycle en saison sèche chaude peut varier de 30 jours. Le taux de stérilité peut présenter des valeurs élevées

certaines années du fait de basses températures à la méiose, réduisant ainsi fortement les rendements (Tableau 1).

Le modèle permet à l'agriculteur d'évaluer les risques entraînés par une décision donnée et de répondre à des questions du type : "compte tenu de mes choix en matière de variété et de date de semis, quel est le risque de récolter après le 10 juillet ? Et quel est le risque que le taux de stérilité dépasse 30% ?".

| Variété | | Aïwu | | Jaya | |
|------------------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
| Date de semis | | 1/02 | 1/03 | 1/02 | 1/03 |
| Longueur de cycle (jours) | moyenne | 126 | 117 | 147 | 138 |
| | mini | 106 | 103 | 131 | 125 |
| | maxi | 146 | 133 | 166 | 152 |
| Date de maturité | moyenne | 7/06 | 26/06 | 28/06 | 17/07 |
| | mini | 18/05 | 12/06 | 12/06 | 4/07 |
| | maxi | 27/06 | 12/07 | 17/07 | 31/07 |
| Taux de stérilité (%) | moyenne | 37.3 | 31.1 | 30.2 | 22.0 |
| | mini | 8.0 | 10.3 | 12.3 | 13.4 |
| | maxi | 83.5 | 70.6 | 67.9 | 34.9 |
| Probabilité que le taux de stérilité dépasse : | 40% | 0.42 | 0.18 | 0.12 | 0.00 |
| | 60% | 0.15 | 0.09 | 0.06 | 0.00 |

Station météorologique : Rosso

Intervalle de simulation : 1950-1983

Tableau 1 : longueur de cycle et taux de stérilité selon la variété et la date de semis

La fréquence des années où apparaît l'événement redouté permet une évaluation du risque. La démarche adoptée prend en compte le niveau de risque que chaque groupe ou individu est prêt à prendre. On passe ainsi de recommandations standards à des propositions adaptées à chaque situation.

Mélanges variétaux

Si les semis d'hivernage ne dépassent pas le 15 août, les agriculteurs enchaînent une variété de cycle court en saison sèche chaude (en général Aïwu), avec une variété de cycle moyen en hivernage (Jaya ou IR1529). Ces dernières variétés sont en effet mieux appréciés pour leur productivité au champ et à l'usinage. Mais cette pratique favorise les mélanges variétaux au sein des parcelles, une partie des grains laissés au sol par les moissonneuses-batteuses germant et levant la campagne suivante (Tableau 2). Ces mélanges entraînent des pertes de rendement par égrenage et prédation des oiseaux sur les premiè-

res panicules arrivant à maturité. Il est également difficile de programmer une date de maturité et de récolte sur des parcelles aussi hétérogènes.

Les paysans sont donc à la recherche d'une variété adaptée aux deux campagnes. Ce problème peut être renvoyé aux sélectionneurs, mais on peut également l'aborder en utilisant le modèle. On constate ainsi qu'à Rosso un semis de Jaya au 1er février, équivaut à un semis d'Aïwu au 1er mars, avec des risques liés à la stérilité du même ordre (Tableau 1). Il est alors possible de récolter Jaya dès le 1^{er} juillet et, selon le mode d'organisation du travail adopté, de ressemer Jaya en hivernage. Cette solution suppose néanmoins que le crédit soit disponible dès janvier, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui ; sa diffusion suppose donc une modification des procédures de la Caisse Nationale de Crédit Agricole. On voit sur cet exemple que l'intérêt d'un tel modèle n'est pas purement agro-physiologique.

| précédent suivant | | Ntiagar | | | Ndiatène | | |
|----------------------|------------------------|---------|-------|-------|----------|-------|-------|
| | | csc91 | hiv91 | csc92 | csc91 | hiv91 | csc92 |
| | | hiv91 | csc92 | hiv92 | hiv91 | csc92 | hiv92 |
| 1 seule variété | Aïwu | 49 | 2 | 22 | 2 | 1 | 76 |
| | Jaya | - | 3 | 4 | - | - | 1 |
| | Total | 49 | 5 | 26 | 2 | 1 | 77 |
| 2 variétés | Aïwu - Jaya | 44 | 4 | 72 | 97 | - | 16 |
| | Jaya - Aïwu | - | 89 | - | - | 93 | - |
| | Autres (même cycle) | - | 2 | 1 | - | - | 6 |
| | Autres (cycles #) | 7 | - | 1 | 1 | 6 | 1 |
| | Total | 51 | 95 | 74 | 98 | 99 | 23 |

Tableau 2 : successions variétales en double culture
(% superficie semée par campagne et village)

Maturité à la récolte

A partir des choix variété, mode et date de semis, le modèle calcule la date à laquelle est atteinte la maturité physiologique, correspondant à une humidité d'environ 20%, pour chaque scénario climatique. Les agriculteurs attendent en général plus longtemps avant de récolter : au mieux 14 à 16% en saison sèche chaude, mais souvent beaucoup plus tardivement en hivernage. Les raisons de ce retard sont diverses : mélanges variétaux, drainage tardif de la parcelle, calage des récoltes sur les dernières parcelles semées. La plupart du paddy est alors récolté à sur-maturité, sa qualité et son rendement à l'usage pouvant alors fortement diminuer (Le Gal, travaux en cours). La comparaison entre

les sorties du modèle et les pratiques des agriculteurs, permet d'aborder ce problème en terme de gestion du calendrier de travail et de qualité du paddy.

Connaissances agro-physiologiques

Dès leur première campagne de saison sèche chaude les agriculteurs peuvent constater, pour une même variété, un allongement du cycle par rapport à la campagne "normale" d'hivernage. Ils tentent de comprendre et d'expliquer ce phénomène, à l'aide de leurs connaissances propres : une relation avec la date tardive d'épandage des engrais est ainsi souvent avancée. L'utilisation du modèle permet de confronter ces connaissances avec celles des experts, de préciser les relations entre développement de la plante et températures de l'air et de l'eau, entre stérilité et températures à la montaison, de différencier phénomènes de croissance et de développement.

Globalement le modèle, bien que relativement simple dans sa conception et sa présentation, facilite l'apprentissage de connaissances nouvelles pour des utilisateurs divers : agriculteurs individuels ou en groupe, conseillers agricoles, *etc.* Il est également un bon outil d'initiation intellectuelle à la simulation, méthode proche du jeu où l'utilisateur construit sa réflexion autour de situations imaginaires.

Le modèle ne peut à lui seul répondre aux problèmes de gestion de calendrier de travail posés par la double culture. C'est pourquoi nous l'avons "couplé" avec un modèle simulant la dynamique de drainage des parcelles avant récolte (Dingkuhn, Le Gal et Raes, travaux en cours), et OTELO, logiciel élaboré par l'INRA-SAD et ESR pour traiter spécifiquement des problèmes d'organisation du travail (Attonaty *et al.*, 1990 ; Le Gal, 1993). Les simulations faites avec OTELO permettent de reproduire le mode d'organisation des agriculteurs pour la récolte et la mise en place de la culture suivante, puis d'évaluer l'intérêt de modifications diverses face à divers scénarios climatiques. Ces simulations débutent avec les récoltes, dont les dates de démarrage sont choisies en fonction des dates de maturité données par le modèle pour une variété et une date de semis, et des dates de portance correspondantes obtenues par le modèle "drainage". On peut alors mesurer les conséquences d'un démarrage tardif des récoltes, d'un choix variétal, d'une date de semis ou de drainage des parcelles, sur l'ensemble du calendrier de travail.

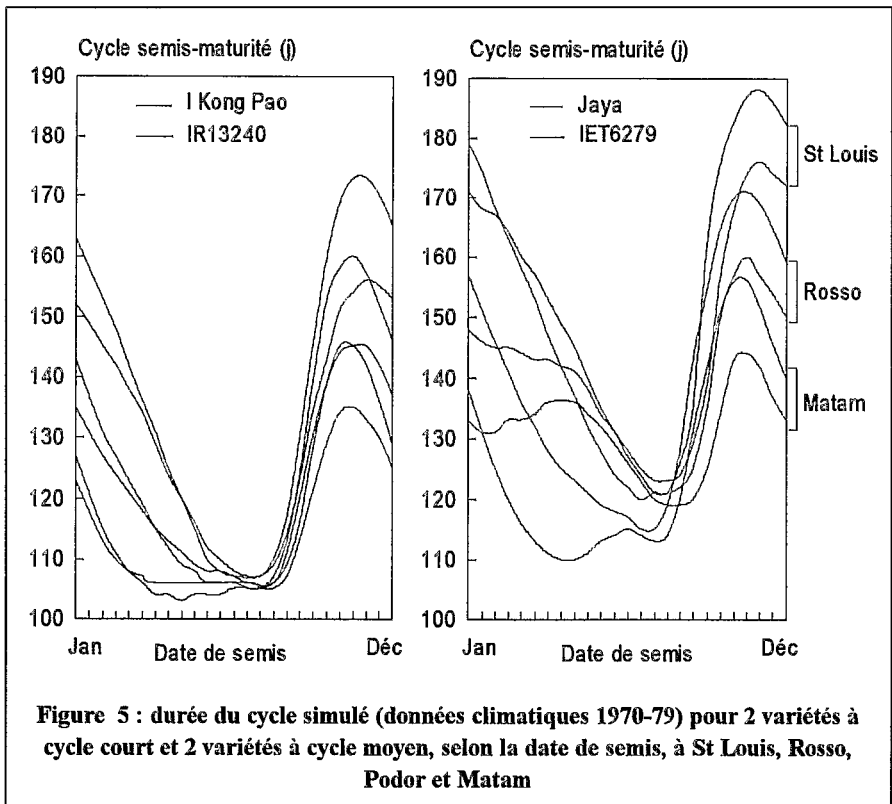
Élaboration d'un catalogue variétal régional

Les différentes zones du Sahel où les paysans pratiquent la riziculture irriguée (nord Sénégal, nord Mali, Niger) présentent des caractéristiques de bases communes : d'une part, un climat sec, avec de fortes variations de température (dans la journée et entre les saisons), des sols pauvres et généralement lourds, et d'autre part, une production de riz qui nécessite des inputs importants. De légères différences en termes de photopériode, de démarrage et de durée de la saison fraîche, et de réponse photothermique des variétés utilisées par les

paysans, ont apparemment modelé des calendriers cultureux spécifiques de chaque site. Ainsi les dates d'implantation du riz sont typiquement Février et Août dans le delta du Sénégal, décembre et juillet au nord du Mali, novembre et juin au Niger (Dingkuhn, 1994). Dans tous les cas, le choix d'une date d'implantation et/ou d'une variété inappropriées est pénalisé par une perte de rendement.

La recherche d'une plus grande flexibilité dans le choix du couple variété - calendrier est à l'origine d'un programme de sélection et de caractérisation variétales initié par l'ADRAO en 1990. Les constantes photothermiques de 49 cultivars ont ainsi été déterminées en 1991-92 sur le site de Ndiaye au Sénégal, puis validées à Niono au Mali, en même temps que le modèle de développement du riz irrigué (Dingkuhn & Miézan, 1994). Ces 49 variétés, qui constituent un catalogue préliminaire, sont toutes bien adaptées sur le plan agronomique à la région du Sahel ; 9 d'entre elles sont communément utilisées par les paysans, 5 au moins correspondent à des introductions largement testées dans le passé, et 5 font actuellement l'objet d'essais sur sites multiples.

L'utilisation du simulateur a permis de mettre en évidence des différences variétales en terme de variation de la durée du cycle selon le site et la date de semis (Figure 5).



Les sites choisis sont répartis le long du fleuve Sénégal, dans le delta et en moyenne vallée, et reflètent un gradient climatique depuis la zone côtière vers l'intérieur du pays. Les durées du cycle les plus courtes apparaissent pour les semis réalisés en juillet ; pour une variété donnée, cette durée minimale varie très peu selon le site. Les durées maximales sont obtenues pour les semis d'octobre-novembre ; elles sont plus longues d'environ 25 jours à Saint-Louis qu'à Matam.

La variété IR13240 comparée à IKP, deux variétés à cycle court et insensibles à la photopériode, offre l'avantage, en plus d'une meilleure qualité du grain, d'avoir un cycle légèrement plus court pour une campagne précoce en contre saison chaude (semis fin janvier - début février) ou tardive en hivernage (semis fin août).

| | | | St Louis | | Rosso | | Podor | | Matam | |
|---------------------|---------|-------|----------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| | | | SD | RP | SD | RP | SD | RP | SD | RP |
| cycle moyen | JAYA | 1/08 | 6 | 22 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| | | 15/08 | 35 | 62 | 24 | 43 | 10 | 27 | 15 | 24 |
| | | 1/09 | 79 | 91 | 71 | 82 | 53 | 75 | 55 | 67 |
| | IET6279 | 1/08 | 3 | 13 | 1 | 10 | 0 | 2 | 0 | 8 |
| | | 15/08 | 23 | 40 | 21 | 29 | 10 | 21 | 16 | 26 |
| | | 1/09 | 57 | 72 | 45 | 70 | 36 | 60 | 37 | 58 |
| cycle court | IKP | 1/08 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 15/08 | 10 | 30 | 8 | 21 | 1 | 12 | 2 | 17 |
| | | 1/09 | 60 | 76 | 46 | 68 | 31 | 53 | 29 | 54 |
| | IR13240 | 1/08 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 15/08 | 10 | 26 | 6 | 22 | 0 | 9 | 1 | 15 |
| | | 1/09 | 51 | 70 | 36 | 59 | 24 | 46 | 25 | 45 |
| cycle très court | AIWU | 1/08 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 15/08 | 1 | 10 | 0 | 8 | 0 | 1 | 0 | 4 |
| | | 1/09 | 29 | 56 | 21 | 38 | 11 | 28 | 18 | 26 |
| | IR39357 | 1/08 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 15/08 | 2 | 10 | 0 | 8 | 0 | 1 | 0 | 3 |
| | | 1/09 | 25 | 47 | 22 | 36 | 11 | 25 | 18 | 27 |

SD : Semis Direct ; RP : Repiquage

Tableau 3 : moyennes sur 10 ans (1970-1979) du taux de stérilité dû au froid simulé pour 6 cultivars (cycle moyen, court, très court), selon le mode de semis (direct ou repiquage), la date de semis (1/08, 15/08, 1/09), le site (St Louis, Rosso, Podor, Matam)

JAYA et IET6279 sont toutes deux des variétés à cycle moyen, mais la première n'est pas sensible à la photopériode et la seconde l'est. Leur comparaison montre que la durée du cycle d'IET6279 présente une relative stabilité à Rosso et Matam pour des semis de janvier à mai, due à une mutuelle neutralisation des sensibilités à la température et à la photopériode (croissance des températures et de la durée du jour). Ainsi, la durée du cycle d'IET6279 est sensiblement plus courte que celle de JAYA pour les semis tardifs en hivernage à cause de la décroissance de la photopériode. La sensibilité à la photopériode est donc potentiellement un élément intéressant vis à vis de la flexibilité des calendriers cultureux, et mérite de futurs approfondissements.

Le tableau 3 présente les taux moyens de stérilité due au froid (en pourcentage du nombre total d'épillets) obtenu par simulation sur 10 ans à Saint-Louis, Rosso, Podor et Matam pour 6 variétés. Il indique que les risques induits par un semis tardif en hivernage dépendent fortement de la variété, du site et du mode de semis. En règle générale, l'implantation tardive et/ou la proximité de la zone côtière requièrent des variétés de cycle court pour échapper à la stérilité provoquée par les basses températures.

Le repiquage, par un léger allongement de la durée du cycle, conduit à un taux de stérilité beaucoup plus fort que le semis direct. De même, de petites différences variétales dans la durée du cycle sont amplifiées en fin d'hivernage : lorsque le stade reproductif est atteint en période fraîche, le cycle est retardé ce qui accroît encore le risque de stérilité des épillets. De nouveau IET6279, comparée à JAYA, présente de meilleurs résultats : sa sensibilité à la photopériode accélère son cycle de développement pendant une saison où la durée du jour décroît.

CONCLUSION

RIDEV, une fois totalement validé pour l'ensemble du Sahel, sera mis à la disposition des utilisateurs potentiels que sont les Programmes Nationaux de Recherche Agricole, les programmes de développement et de vulgarisation de la riziculture, ainsi que les coopératives et groupements paysans. Ses applications, en conjonction avec un catalogue variétal pourront concerner différentes démarches :

L'analyse des résultats des simulations permet d'aborder les connaissances agro-physiologiques sous-jacentes. L'utilisation de RIDEV pour la formation du personnel de recherche ou des sociétés de développement constitue ainsi une voie intéressante.

La simulation directe permet d'éliminer du catalogue certaines combinaisons "variété-calendrier" selon le site, ou au contraire d'en identifier certaines. Celles-ci devront évidemment être testées en station avant d'être diffusées. La simulation devient ainsi un instrument exploratoire pour l'expérimentation.

Les résultats obtenus par RIDEV peuvent être incorporés dans des modèles plus généraux comme OTELO, ou des modèles d'élaboration du rendement (travaux en cours). Ces outils permettent d'analyser les conséquences des pratiques, et de concevoir avec les paysans et les acteurs du développement de nouveaux modes de conduite qui prennent en compte les contraintes de la production (Aubry *et al.*, 1992).

□ □ □

BIBLIOGRAPHIE

- ADRAO, 1993. Annual Report for 1992. *ADRAO, 01 B.P. 2551 Bouaké, Côte d'Ivoire. pp. 12-22.*
- ADRAO, 1994. Annual Report for 1992. *ADRAO, 01 B.P. 2551 Bouaké, Côte d'Ivoire, à paraître.*
- Alocija R.B., Cervantes E.B., Haws L.D., 1981. A continuous rice production system... the rice garden. *International Rice Research Institute, P.O. Box 933, Manila, Philippines. 16 p.*
- Attonaty J.M., Chatelin M.H., Poussin J.C., Soler L.G., 1990. Un simulateur à base de connaissance pour raisonner équipement et organisation du travail en agriculture. In *"Economics and Artificial Intelligence"*. Paris, ed. P. Bourguin and B. Walliser, pp. 291-297.
- Aubry M.C., Chatelin M.H., Poussin J.C., Attonaty J.M., Masse J., Meynard J.M., Gérard C., Robert D., 1992. DECIBLE : a decision support system for wheat management. *4^{ème} Congrès International d'Informatique Agricole. Versailles. Juin 1992*
- Dingkuhn M., 1992. Physiological and ecological basis of varietal rice crop duration in the Sahel. In *"Annual Report for 1991"*. ADRAO, 01 B.P. 2551 Bouaké, Côte d'Ivoire. pp. 12-22.
- Dingkuhn M., Sow A., Samb A., Asch F., 1994. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel (Part I). Photothermal response of flowering and interactions with microclimate. *Agricultural Systems, à paraître.*
- Dingkuhn M., Miézan K.M., 1994. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel (Part II). Model validation and simulation-based characterization of the varietal spectrum present in the Sahel. *Agricultural Systems, à paraître.*
- Dingkuhn M., 1994. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel (Part III). Characterizing environments by simulating the crop's photothermal responses. *Agricultural Systems, à paraître.*
- Le Gal P.Y., 1993. Processus de décision et innovation : l'exemple de la double riziculture irriguée dans le Delta du fleuve Sénégal. *Communication au Séminaire CIRAD - INRA - ORSTOM "Innovations et Sociétés", 13-16 septembre 1993, Montpellier (FRANCE).*
- Munier B., 1989. Calcul économique et révision de la théorie de la décision en avenir risqué. *Revue d'Economie Politique, Vol. 99, n°2, pp. 276-306.*
- Nishimaya I., 1984. Climatic influence on pollen formation and fertilization. In *"Biology of Rice"*. Ed. Tsumoda S. and Takashahi N. Elsevier, Amsterdam - Oxford - New York - Tokio. pp. 153-171.

□ Penning de Vries F.W.T., Jansen D.M., Ten Berge H.F.M., Bakema A., 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. *PUDOC Wageningen, Netherlands*. 291 p.

□ Summerfield R.J., Collinson S.T., Ellis R.H., Roberts E.H., Penning de Vries F.W.T.. 1992. Photothermal responses of flowering in rice (*Oryza sativa*). *Annals of Botany*, 69, pp. 101-112.

□ Vergera B.S., Chang T.T., 1985. The flowering response of the rice plant to photoperiod. A review of the literature. *Fourth edition. International Rice Research Institute, P.O. Box 933, Manila, Philipines*. 61 p.

□ Yoshida S., 1981. Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute, P.O. Box 933, Manila, Philipines. 269 p.

□ □ □