

Gestion collective et productivité des périmètres irrigués villageois

J.C. Poussin⁽¹⁾, Youssouf Diallo⁽²⁾, J.C. Legoupil⁽³⁾

⁽¹⁾IRD, Tunis, Tunisie ; poussin@ird.fr

⁽²⁾CNRADA, Nouakchott, Mauritanie

⁽³⁾CIRAD, Montpellier, France

Résumé

Dans la vallée du Sénégal, les périmètres irrigués couvrent environ 50 000 ha répartis sur les deux rives et la riziculture est la principale activité. Comme dans d'autres régions du monde, on observe un écart important entre les rendements réels et potentiels. Ici, les rendements potentiels de la riziculture irriguée atteignent 8 à 10 t/ha alors que les rendements réels stagnent entre 4 et 5 t/ha et les coûts de production moyens (hors frais de récolte) correspondent à près de 2 t/ha d'équivalent paddy. Les aménagements sont, dans leur grande majorité, exploités par des agriculteurs issus d'un ou de plusieurs villages et sont gérés, depuis la fin des années 1990, par des organisations paysannes. Les périmètres irrigués villageois de moins de 50 ha et regroupant des paysans issus d'un même village couvrent 25 % des terres aménagées. Au cours des hivernages 1998, 1999 et 2000, nous avons mis en œuvre une approche participative pour promouvoir une meilleure conduite de culture dans un périmètre irrigué villageois mauritanien. Cette approche, fondée sur l'amélioration de l'organisation collective à l'échelle de l'aménagement hydro-agricole, utilise un logiciel de simulation CalCul. Ce logiciel permet d'élaborer avant le démarrage de la campagne une prévision du calendrier cultural du riz irrigué à l'échelle du périmètre. Le rendement moyen est passé de 4,7 t/ha en 1998 à 7,2 t/ha en 1999 et 8,2 t/ha en 2000 sans augmentation sensible des coûts de production. Cette hausse importante de productivité a été due principalement à l'amélioration de la gestion collective du tour d'eau et à la planification du calendrier cultural.

Mots clés : gestion collective, prévision, aide à la décision, riziculture.

1 Introduction

Dans beaucoup de régions du monde, les rendements réels de la riziculture irriguée se situent entre 4 et 6 tonnes/ha, alors que le rendement potentiel atteint 10 à 11 tonnes/ha (Tran, 2004). Beaucoup d'études dans différents pays ont montré la possibilité d'accroître la production de riz en augmentant l'efficacité des intrants agricoles (Cantrell et Hettel, 2004 ; Defoer *et al.*, 2004 ; Tantawi, 2004).

Dans la vallée du fleuve Sénégal, les périmètres irrigués couvrent environ 50 000 ha (SAED, 1997 ; SONADER, 1998) et la majorité des surfaces est exploitée en riziculture. Le rendement potentiel – limité seulement par le rayonnement net et la température – de la riziculture irriguée s'élève à 9 t/ha (Dingkuhn et Sow, 1997) en hivernage de juin à novembre, alors que les rendements qu'obtiennent les paysans sont de l'ordre de 5 t/ha (SAED, 1997 ; SONADER, 1998). Des études agronomiques (Le Gal, 1997 ; Wopereis *et al.*, 1999 ; Haefele *et al.*, 2001 ; Poussin *et al.*, 2003) ont montré que le

mauvais calage des interventions culturales (dates de semis ou de repiquage, de traitement herbicide et d'application d'engrais) est un des facteurs principaux limitant les rendements.

Les programmes d'ajustement structurel menés par le Sénégal et la Mauritanie dans les années 1990 ont promu la responsabilisation des agriculteurs et ont abouti à ce qu'ils prennent en main la gestion de la plupart des aménagements. Ainsi, les décisions de tour d'eau, de préparation du sol, de commande d'engrais et d'herbicides, de récolte et de commercialisation de la production sont prises collectivement à l'échelle de l'aménagement. En outre, la réalisation d'une campagne de cultures nécessite généralement un emprunt bancaire collectif, remboursé après la récolte – l'octroi d'un crédit bancaire étant conditionné par le remboursement de l'emprunt précédent. Les décisions individuelles, à la parcelle, sont donc fortement influencées par les décisions prises collectivement à l'échelle de l'aménagement (Poussin, 1995 ; Le Gal et Papy, 1998). Au sein du même aménagement collectif, les agriculteurs sont techniquement et financièrement solidaires ; par conséquent, dans ces aménagements, améliorer la productivité seulement à l'échelle individuelle n'est pas un objectif durable.

Ainsi, pour améliorer la productivité de la riziculture dans les aménagements collectifs, nous avons proposé d'améliorer l'organisation collective en construisant, avant le démarrage de la campagne, un calendrier prévisionnel des interventions à l'échelle du périmètre irrigué. Nous avons testé cette démarche dans un périmètre irrigué villageois mauritanien durant trois campagnes de culture consécutives, 1998, 1999 et 2000.

2 Matériels et Méthodes

2.1 Site étudié

Le périmètre irrigué villageois que nous avons étudié est situé à Nakhlet, petit village sur la rive mauritanienne, à environ 200 km de l'embouchure du Sénégal. Ce type de périmètre, fréquent dans les deux pays riverains (Sénégal et Mauritanie), de moins de 50 ha et cultivé par des paysans du même village, couvre environ la quart des surfaces aménagées (SEAD, 1997 ; SONADER, 1998).

Le périmètre de Nakhlet a été aménagé en 1981 par la SONADER (Société nationale d'aménagement et de développement rural). Il couvre une superficie de 27,5 ha, subdivisée en 119 parcelles exploitées par 29 agriculteurs. Après dix ans de gestion parapublique par la SONADER, en 1992, les paysans de Nakhlet, regroupés en organisation paysanne, ont pris en main la gestion du périmètre.

L'irrigation est assurée par un groupe motopompe (GMP) qui pompe l'eau d'un défluent du Sénégal. La riziculture irriguée est pratiquée seulement en hivernage de juin à novembre. La culture est mise en place dans toutes les parcelles par semis direct dans une lame d'eau, après une préparation du sol motorisée à l'aide d'un pulvérisateur à disques. Les paysans utilisent des semences prégermées, soit issues de leur précédente récolte, soit certifiées et achetées auprès d'un revendeur. L'organisation paysanne gère l'emprunt collectif avant le démarrage de la campagne, les achats d'intrants agricoles, le fonctionnement du groupe motopompe, l'irrigation, la préparation du sol effectuée par un prestataire de service. Chacun des 29 agriculteurs est à tour de rôle aiguardier. L'organisation paysanne distribue les engrais, les herbicides (et éventuellement les semences) aux agriculteurs au prorata de la surface exploitée, et récupère auprès d'eux en paddy après la récolte la valeur des intrants achetés et des prestations fournies. La commercialisation du paddy permet de rembourser l'emprunt collectif. Ce fonctionnement est typique des périmètres irrigués villageois sur les deux rives du fleuve (Diemer et van der Laan, 1987).

2.2 Suivi hydraulique, agronomique et économique.

Le suivi réalisé sur le périmètre en 1998 a servi à déterminer la situation initiale en termes (i) de gestion de l'eau et de la culture, (ii) des écarts au rendement potentiel et (iii) de la variabilité des résultats entre parcelles.

Durant les hivernages 1998 et 1999, nous avons mesuré chaque jour le volume d'eau pompé pour irriguer le périmètre. Le débit a été jaugé en tête du périmètre par un déversoir à base rectangulaire implanté transversalement à la sortie du bassin de décantation en aval du groupe motopompe. Les caractéristiques de ce déversoir (longueur de la base et coefficient de déversement) permettent de calculer le débit selon la hauteur de charge au dessus du seuil mesurée sur une échelle limnimétrique placée dans le bassin (Bos *et al.*, 1991) :

$$Q = Cd.b.(2.g)^{0,5} . H^{1,5}$$

Avec

Q : débit (m³/s)

L : longueur du seuil (m)

M : coefficient de déversement

g : accélération de la pesanteur (m/s²)

H : hauteur de charge (m)

Le compteur horaire du groupe motopompe mesure la durée du pompage. Le volume d'eau pompé chaque jour est égal au produit de la durée de pompage par le débit moyen mesuré à la sortie du déversoir. On a estimé le volume d'eau disponible pour l'irrigation des parcelles à 70 % du volume pompé afin de rendre compte des pertes dans le réseau (Tuzet et Perrier, 1998). Nous avons ensuite fait l'hypothèse que ce volume d'eau était distribué de manière homogène entre les différentes parcelles irriguées le même jour. Ce suivi n'a pas été reconduit en 2000 car les paysans ont conservé les mêmes règles de tour d'eau qu'en 1999.

Des échantillons de l'horizon de sol superficiel (0-20 cm) ont été prélevés dans toutes les parcelles avant le démarrage de la culture en 1998. Un échantillon composite (mélange de 4 échantillons prélevés au hasard dans chaque parcelle) a été analysé (taux d'argile, taux de carbone et d'azote total, pH, conductivité électrique, capacité d'échange cationique, phosphore assimilable, potassium échangeable). Les disponibilités mesurées en P et K du sol sont supérieures aux seuils critiques pour le riz (Dobermann *et al.*, 1995 ; Sanchez, 1976), la conductivité électrique et le pH mesurés ne constituent pas de facteur limitant pour la culture du riz, sous réserve d'une bonne conduite de l'irrigation (Asch et Wopereis, 2000).

Pour chacune des 119 parcelles en hivernage 1998, 1999 et 2000, les informations suivantes ont été enregistrées : variété semée, type de semence (certifiée ou issue de paddy récolté), types et doses d'engrais, types de désherbage et doses si désherbage chimique, et date de chaque intervention, de la préparation du sol à la récolte. De plus, une note d'envahissement par les adventices au stade de l'initiation paniculaire a été attribuée à chaque parcelle. Cette note (0 à 3) reflète le pourcentage de recouvrement par les mauvaises herbes, lui-même corrélé à la biomasse d'adventices (Poussin *et al.*, 2003) : note 0, absence ; note 1, faible infestation (moins de 10 % de la surface couverte) ; note 2, infestation forte (10 à 30 % de la surface couverte) ; note 3, infestation très forte (plus de 30 % de la surface couverte). Le rendement en grain (corrigé à 14 % d'humidité) a été mesuré à la maturité physiologique au centre de chaque parcelle sur une placette de 25 m². Le rendement mesuré ainsi peut être sensiblement supérieur au rendement de la parcelle ; néanmoins, les rendements peuvent être comparés d'une année à l'autre.

Les agriculteurs ont financé les trois campagnes d'hivernage à l'aide d'un emprunt bancaire souscrit collectivement via l'organisation paysanne, qui a acheté les intrants (gas-oil, semences, engrais herbicides) et les a distribué aux paysans au prorata des surfaces cultivées. Les paysans ont

remboursé après la récolte en paddy. Le paddy a été vendu à l'Etat qui garantit un prix de 38 à 45 Ouguiya (unité monétaire mauritanienne [MRO] ; 100 MRO équivalent à 0,317 € en juillet 2005) selon le taux de brisure (SONADER, 1998). Un suivi financier a été effectué à l'échelle du périmètre en 1998, 1999 et 2000. Les produits sont constitués par la vente du paddy récolté au prix moyen de 42 MRO/kg. Seules les charges opérationnelles et salariales ont été prises en compte. Le coût de l'irrigation comprend le coût du gas-oil pour le pompage, de l'huile, de l'entretien courant, des réparations et le salaire du pompiste. Les charges de culture comprennent la prestation de préparation du sol, les semences certifiées, les engrais et les herbicides. Les coûts ont été évalués d'après les factures des fournisseurs et des prestataires de service ; les charges ne comprennent pas les coûts de main-d'œuvre qui est quasiment exclusivement familiale. Le coût de la semence issue du paddy récolté a été fixé à 45 MRO/kg. En 1998 et en 1999, les agriculteurs ont récolté leur parcelle et battu leur récolte à la main ; en 2000, la récolte a été faite à la moissonneuse-batteuse par un prestataire de service. Pour comparer les années, nous n'avons pas pris en compte les coûts de récolte. Cela nous a permis de calculer une marge brute à l'échelle de l'aménagement. En affectant les coûts aux différentes parcelles selon la quantité d'intrant consommée (semences, engrais, herbicides) ou selon la surface (irrigation, préparation du sol), nous avons calculé également une marge brute pour chaque parcelle.

2.3 Modèles utilisés pour le diagnostic

La hauteur des pluies a été enregistrée quotidiennement à l'aide d'un pluviomètre. L'évapotranspiration de référence a été calculée selon l'équation de Penman-Monteith (Smith *et al.*, 1992 ; Allen *et al.*, 1998) avec les données climatiques enregistrées sur la station expérimentale de l'ADRAO (Association pour le développement de la riziculture en Afrique de l'Ouest) située à Fanaye, en face de Nakhlet, sur la rive sénégalaise. L'évapotranspiration du riz a été calculée de la façon suivante : évapotranspiration de référence multipliée par le coefficient cultural (kc) qui varie selon le stade de la culture. Nous avons utilisé les coefficients donnés par la FAO (1986) et Siddeek *et al.* (1988) pour le riz irrigué : kc est égal à 1,15 durant la phase végétative, puis 1,30 jusqu'à la fin de la première semaine de remplissage des grains, et 1,05 du remplissage des grains à la récolte. L'évapotranspiration cumulée a été comparée au cumul des pluies et de l'eau d'irrigation afin de déceler un éventuel risque de stress hydrique.

Le modèle de croissance du riz irrigué *OryzaS* (Dingkuhn et Sow, 1997) permet de calculer le rendement potentiel du riz irrigué en conditions climatiques sahéliennes, en fonction des températures journalières minimales et maximales de l'air, du rayonnement net et de la latitude (pour calculer la photopériode). Nous avons utilisé ce modèle pour calculer le rendement potentiel (et donc l'écart de rendement) de chaque parcelle pour chaque saison de culture en utilisant des enregistrements climatiques pour les mêmes périodes à Fanaye.

Le modèle de développement du riz irrigué au Sahel (RIDEV) mis au point par Dingkuhn *et al.* (1995) a été utilisé pour reconstituer les dates des différents stades phénologiques pour chaque saison dans chaque parcelle, les dates optimales des interventions pour les applications d'engrais et d'herbicide, la date de récolte, sur la base des enregistrements climatiques pour les mêmes périodes à Fanaye. Cela a permis de calculer le décalage entre le calendrier des interventions et le calendrier cultural optimal pour chaque parcelle en 1998, 1999 et 2000.

3 Construction d'un calendrier cultural prévisionnel à l'échelle du périmètre irrigué

Le logiciel CalCul (Calendrier Cultural) est fondé sur le modèle de simulation de développement du riz irrigué au Sahel, RIDEV, conçu par l'ADRAO (Dingkuhn *et al.*, 1995). Il permet de calculer un calendrier prévisionnel des interventions culturales, de la préparation du sol jusqu'à la récolte, à

l'échelle de l'aménagement en fonction de l'organisation des chantiers collectifs – c'est-à-dire gérés et réalisés collectivement sur le périmètre irrigué.

3.1 Le modèle RIDEV

Le modèle RIDEV simule le développement du riz dans les conditions climatiques sahéliennes et fournit le calendrier cultural optimal à l'échelle de la parcelle. Les données en entrée sont : la variété semée, la date de semis, le mode d'implantation (semis direct ou repiquage), le lieu (la latitude du lieu sert au calcul de la photopériode) et le (ou les) scénario(s) climatique(s) (températures journalières minimales et maximales) utilisés pour la simulation. Les principales variétés utilisées au sahel ont été caractérisées par l'ADRAO (Dingkuhn et Miézan, 1995). En sortie, RIDEV fournit pour chaque scénario les dates d'apparition des stades floraison et maturité physiologique du riz, les dates optimales des désherbages, des apports d'engrais et du drainage avant la récolte et le taux de stérilité des épillets induite par des températures extrêmes (froid ou chaleur) durant la floraison.

Ce modèle permet de construire un calendrier cultural prévisionnel à la parcelle. Il a été utilisé pour cela par Wopereis *et al.* (2001) au Sénégal et en Mauritanie.

3.2 Construction d'un calendrier cultural prévisionnel à l'échelle du périmètre

Dans la plupart des aménagements, la préparation du sol mécanisée, la mise en eau des parcelles avant le travail du sol (pré-irrigation) ou avant le semis (mise en eau), le repiquage et la récolte mécanisée sont effectués de façon collective dans l'ensemble du périmètre (Poussin, 1997 ; Le Gal et Papy, 1998). Etablir un calendrier cultural à l'échelle de l'aménagement nécessite donc de prendre en compte comment ces chantiers sont organisés et comment ils se succèdent.

Afin d'éviter les fuites, la préparation du sol et la mise en eau ne sont pas réalisées simultanément sur l'ensemble du périmètre. La mise en eau de chaque parcelle a lieu juste avant le semis ou le repiquage et peut durer deux ou trois jours. Les dates optimales de repiquage, des apports d'engrais et de la récolte sont fondées sur les stades phénologiques. Par conséquent, pour obtenir un calendrier optimal sur toutes les parcelles, toutes les interventions, du semis à la récolte, doivent avoir la même durée dans tout le périmètre (par exemple le semis des pépinières est réalisé en deux jours et le repiquage en quinze jours), sinon certaines parcelles ne seront pas traitées à la date optimale (dans le même exemple, si les premières parcelles sont repiquées à la date optimale, les dernières parcelles seront repiquées avec deux semaines de retard). La durée de chaque intervention, en particulier le semis, retenue pour le périmètre devra donc être celle du chantier collectif le plus lent.

Les données en entrée du logiciel CalCul sont :

- la date prévue pour le démarrage des semis ;
- la (ou les) variété(s) semée(s) ;
- le mode d'implantation (supposé commun à toutes les parcelles) ;
- la durée de chaque chantier collectif, c'est-à-dire la préparation du sol, la mise en eau et la pré-irrigation (supposées durer le même temps), le repiquage (si c'est le mode d'implantation choisi) et la récolte (si elle est faite collectivement) ;
- en cas de pré-irrigation, il faut entrer la durée moyenne de ressuyage.

Les agriculteurs choisissent généralement de façon autonome la variété semée (Poussin, 1995) et les deux modes d'implantation peuvent coexister sur le même aménagement (Poussin, 1997). Néanmoins, selon la saison, les agriculteurs utilisent des variétés à précocités voisines. En cas de choix de variétés de cycles différents, il est préférable de semer d'abord la variété la plus tardive et de terminer par la variété la plus précoce afin de réduire la durée totale de la culture – donc de l'irrigation. Les deux modes d'implantation conduisent pour la même variété à des durées de cycle différentes. Par conséquent, si ces deux modes coexistent dans le périmètre, il faudra réaliser deux calendriers prévisionnels.

CalCul utilise le modèle RIDEV pour effectuer deux simulations de développement du riz : une première simulation (S1) avec la première variété et la première date de semis prévue, une seconde simulation (S2) avec la seconde variété (qui peut être la même que pour S1) et la dernière date de semis prévue (la date de début des semis ajoutée à la durée commune d'avancement des travaux). Les deux simulations S1 et S2 sont faites en utilisant les températures journalières minimales et maximales de l'air enregistrées les années précédentes sur une station météorologique proche de l'aménagement. Chaque simulation fournit les dates moyennes et extrêmes de divers stades phénologiques (figure 1) : début tallage, initiation paniculaire, épiaison, floraison et maturité. Le taux de stérilité des épillets (minimum, moyen et maximum) est également calculé pour chaque simulation.

A l'échelle du périmètre, la période d'apparition d'un stade phénologique est comprise, en moyenne, entre la date moyenne d'apparition de ce stade pour S1 et celle pour S2 ; elle débute au plus tôt à la date minimale d'apparition du stade pour S1 et termine au plus tard à la date maximale d'apparition du stade pour S2. Les périodes optimales (dates moyennes et extrêmes) de réalisation des interventions culturales (repiquage, désherbages, apports d'engrais, drainage avant récolte, récolte) sont fondées sur les dates d'apparition des stades phénologiques. La mise en eau de chaque parcelle peut durer deux ou trois jours et se termine la veille du semis. La préparation du sol se termine généralement la veille du démarrage de la mise en eau, mais elle peut aussi terminer la veille de la mise en eau de la dernière parcelle. La date de démarrage de la pré-irrigation est fonction de la durée de ressuyage. Les recommandations en matière de désherbage et d'apport d'engrais sont conformes à celles produites par RIDEV et préconisées par l'ADRAO (Wopereis *et al.*, 2001). Le calendrier cultural dans chaque parcelle doit être synchronisé avec le calendrier à l'échelle du périmètre. La réalisation des interventions dans les parcelles doit suivre le tour d'eau.

4 Situation initiale : diagnostic de l'hivernage 1998

Au cours de l'hivernage 1998, les agriculteurs ont semé deux variétés : Jaya sur 15,5 ha, 65 parcelles et Sahel 108 sur 12 ha, 54 parcelles – première mise en culture de cette variété à Nakhlet. Les semences Jaya sont issues de la récolte précédente alors que les semences Sahel 108 sont certifiées. La récolte a été faite manuellement en moyenne 17 jours après la maturité physiologique (simulation avec RIDEV) pour Jaya et 20 jours pour Sahel 108 (figure 2). Les simulations faites avec RIDEV n'ont indiqué aucun problème de stérilité d'épillets dans les parcelles. Le rendement potentiel moyen obtenu par simulation avec OryzaS s'est élevé à 8,7 t/ha pour Jaya et 8,2 t/ha pour Sahel 108, alors que les rendements obtenus se sont étagés entre 2,7 et 7,1 t/ha avec une moyenne de 4,8 t/ha. Les faibles rendements ont été plutôt localisés dans les parcelles éloignées de la source d'irrigation. Le rendement moyen de la variété Jaya (5,5 t/ha) a été significativement plus élevé (test de Fisher, $p < 0,0001$) que celui de la variété Sahel 108 (4,0 t/ha). Les agriculteurs ont voulu comprendre les raisons de la variabilité des rendements et les causes de la performance moins élevée de la variété Sahel 108 par rapport à Jaya.

4.1 Gestion de l'irrigation

L'irrigation a démarré le 19 juin 1998 par la mise en eau avant le semis direct et s'est achevée le 30 septembre. Le volume total d'eau pompé est de 265 700 m³ dont 79 000 m³ pour la mise en eau (tableau 1). En moyenne, le cumul de l'eau d'irrigation et des pluies a dépassé le cumul de l'évapotranspiration du riz de 160 mm, alors que les pertes d'eau par infiltration ont été d'environ 2 mm par jour (soit 200 mm sur l'ensemble du cycle) dans ce type de sol (Raes *et al.*, 1997).

Les parcelles ont été irriguées 4 à 9 fois après la mise en eau. L'apport d'eau d'irrigation (mise en eau incluse) est de 528 mm à 828 mm selon la fréquence d'irrigation (tableau 2). La fréquence d'irrigation et les apports d'eau ont été plus faibles dans les parcelles en aval, majoritairement semées avec la variété Sahel 108. Les règles d'allocation de l'eau d'irrigation fondées sur la

réinitialisation du tour d'eau après une pluie sont à l'origine de l'hétérogénéité de fréquence d'irrigation entre parcelles.

L'effet de la fréquence d'irrigation (via la quantité d'eau apportée et le risque de stress hydrique) sur le rendement est hautement significatif (ANOVA, test de Student, $p < 0,0001$). Les parcelles irriguées moins de 7 fois après la mise en eau sont majoritairement semées avec Sahel 108, tandis que celles irriguées au moins 7 fois sont majoritairement semées avec Jaya (tableau 2). Cela peut expliquer la différence de rendement entre les deux variétés. Néanmoins, dans les parcelles irriguées 6 ou 7 fois après la mise en eau et semées avec les deux variétés, les rendements obtenus avec Jaya sont significativement (test de Student) plus élevés qu'avec Sahel 108.

Tableau 1. Volumes d'eau pompée et apports d'eau estimés (moyenne et écart-type) pour la pré-irrigation, la mise en eau et l'irrigation en 1998 et en 1999. L'évapotranspiration du riz et l'apport d'eau par les pluies sont également indiqués.

	Hivernage 1998			Hivernage 1999		
	Volume d'eau pompée (103 m3)	Apport d'eau dans les parcelles (mm) moy. (ET)	Nombre d'irrigation après la mise en eau moy. (min - max)	Volume d'eau pompée (103 m3)	Apport d'eau dans les parcelles (mm) moy. (ET)	Nombre d'irrigation après la mise en eau moy. (min - max)
Pré-irrigation	-			70,1	171 (14)	
Mise en eau	79,0	202 (18)		70,3	181 (35)	
Irrigation	216,3	554 (105)	6,5 (4-9)	233,0	589 (67)	8,2 (8-9)
Total	295,3	756 (110)		373,4	939 (72)	
Pluies (mm)		207			183	
Evapotranspiration du riz (mm)		802			774	

Tableau 2. Rendements obtenus en 1998 dans les parcelles semées avec Jaya et Sahel 108 et apports d'eau estimés en fonction du nombre d'irrigation après la mise en eau.

Nombre d'irrigation après la mise en eau	4	5	6	7	8	9
Apport d'eau (mm)	528	602	666	720	774	828
Nombre de parcelles	11	21	26	33	14	14
Rendement (t/ha) moy. (ET)	4,07 (0,24)	4,03 (0,18)	4,50 (0,21)	5,04 (0,14)	5,37 (0,17)	5,92 (0,18)
Nombre de parcelles semées avec Jaya	1	6	11	20	13	14
Rendement (t/ha) moy. (ET)		5,47 *** (0,90)			5,41 *** (0,79)	
Nombre de parcelles semées avec Sahel 108	10	15	15	13	1	0
Rendement (t/ha) moy. (ET)		3,79 *** (0,47)			4,48 *** (0,55)	

*** comparaison entre variétés avec test de Student et $p < 0,001$.

4.2 Désherbage et fertilisation

Avant le démarrage de la campagne 1998, les herbicides (110 litres de propanil et 55 litres de 2-4 D amine) ont été achetés par l'organisation paysanne et ont été distribués aux paysans au prorata de la surface exploitée. Le premier désherbage a été réalisé dans toutes les parcelles à une dose moyenne de 4 litres/ha de propanil et de 2 litres/ha de 2-4 D amine (c'est-à-dire proche des doses

recommandées). Ce premier désherbage a eu lieu en moyenne 27 jours après semis (JAS) ; l'écart entre la date d'intervention et la date optimale pour ce désherbage (simulée avec RIDEV) va de - 2 à + 17 jours. Malgré une forte infestation par les adventices observée au stade de l'initiation paniculaire (note d'infestation > 1 ; figure 2), quelques parcelles seulement ont été désherbées manuellement avant le second apport d'engrais. Le retard de désherbage, les sous-dosage de l'herbicide et l'absence de second désherbage sont des pratiques courantes dans les périmètres irrigués sur les deux rives du fleuve (Haeefele *et al.*, 2001 ; Poussin *et al.*, 2003). Par ailleurs, les notes d'infestation au stade de l'initiation paniculaire ont été plus élevées dans les parcelles à l'aval du réseau (dans lesquelles la fréquence d'irrigation a été plus faible et le risque d'assèchement de la lame d'eau plus élevé) majoritairement semées avec Sahel 108.

L'organisation paysanne a également acheté 7 tonnes d'urée et 2,75 tonnes de TSP, superphosphate triple (20 % P). Ces engrais ont été distribués proportionnellement à la surface cultivée à raison de 250 kg/ha d'urée (soit 115 kg/ha N) et 100 kg/ha de TSP (soit 20 kg/ha P), ce qui est très proche des doses recommandées (120 kg/ha N et 20 kg/ha P). En moyenne, 117 kg/ha N et 19 kg/ha P ont été épandus en deux apports. Les paysans ont eu des difficultés pour diviser les sacs d'engrais selon la taille de leurs parcelles, ce qui explique la variabilité des doses apportées, notamment d'azote (entre 90 et 150 kg/ha N). Néanmoins, aucune corrélation n'a pu être observée entre la dose d'azote apporté et le rendement. Cette absence de corrélation correspond à une forte variabilité de l'efficacité des apports d'engrais azoté observée dans des situations similaires par Wopereis *et al.* (1999) et Haeefele *et al.* (2001).

Tous les agriculteurs ont fait deux apports d'engrais (figure 2) : le premier, en moyenne 36 JAS, pour la totalité du TSP et la moitié de l'urée, et le second, en moyenne 60 JAS, pour le reste d'urée. Les dates optimales simulées avec RIDEV sont, en moyenne, pour le premier apport 23 JAS et pour le second 60 JAS avec la variété Jaya et 50 JAS avec la variété Sahel 108. L'écart entre la date d'apport et la date optimale est étagé entre 2 et 23 jours de retard pour le premier apport et entre -9 et +21 (-9 signifie avec 9 jours **d'avance**, +21 signifie avec 21 jours **de retard** par rapport à la date optimale) jours de retard pour le second apport. L'accroissement du retard s'est traduit par une forte chute du rendement maximum (figure 5), c'est-à-dire une baisse de l'efficacité de l'apport d'azote. L'écart pour le second apport a été plus fort pour Sahel 108 (en moyenne 11 jours de retard) que pour Jaya (en moyenne 1 jour de retard). Les agriculteurs ont dans l'ensemble bien respecté les recommandations des conseillers agricoles qui préconisent un second apport 60 jours après semis (SONADER, 1998). Malheureusement, cette recommandation ne concorde pas avec Sahel 108 dont le cycle est 10 jours plus court que celui de la variété Jaya en hivernage (selon les simulations réalisées avec RIDEV et les températures enregistrées à Rosso entre 1974 et 1984).

Une fréquence d'irrigation faible et un calendrier du désherbage et des apports d'azote non optimisés ont conduit à des pertes de rendement. Une fréquence d'irrigation plus faible conjuguée à une plus forte infestation par les adventices et un retard plus important pour l'apport d'azote dans les parcelles cultivées avec Sahel 108 par rapport à celles cultivées avec Jaya sont à l'origine des différences de rendements observées entre les deux variétés.

4.3 Changements techniques et organisationnels proposés

Lors d'une assemblée générale de l'organisation paysanne, en avril 1999, notre diagnostic sur l'hivernage 1998 a été présenté aux agriculteurs et divers changements leur ont été proposés dans l'organisation afin de réduire la variabilité de la fréquence d'irrigation et l'écart entre le calendrier des interventions et le calendrier optimal.

Nous avons ainsi proposé que le tour d'eau continue après une pluie au lieu qu'il soit réinitialisé. Pour mettre en place un système d'information sur l'irrigation, un plan parcellaire du périmètre a été installé. Le but de ce plan est d'indiquer chaque semaine (en se fondant sur le tour d'eau) quelles sont les parcelles à irriguer, et l'agriculteur-aiguadier doit indiquer sur ce plan quelles parcelles ont été irriguées afin d'informer les autres agriculteurs qui seront aiguadiers à leur tour. Nous avons

également proposé de construire un calendrier prévisionnel des interventions à l'échelle du périmètre et d'installer un plan parcellaire du périmètre indiquant de façon hebdomadaire quelles interventions doivent être faites et sur quelles parcelles.

Les conseillers agricoles de la SONADER ont également proposé de réaliser une pré-irrigation environ un mois avant la préparation du sol en hivernage 1999 afin de mieux contrôler les mauvaises herbes et d'utiliser la variété Sahel 202 en 2000.

Les agriculteurs ont accepté ces propositions ; ils ont en outre choisi de retarder les semis de manière à retarder la récolte après la période pluvieuse.

Les calendriers prévisionnels ont été établis pour les années 1999 et 2000 en utilisant le logiciel CalCul. La mise en eau a représenté le chantier collectif le plus lent et sa durée (12 jours) a servi de durée commune à l'échelle du périmètre pour toutes les interventions. Après cette phase de prévision, les agriculteurs ont été libres de conduire leur campagne, sans interférence de notre part. Les suivis réalisés en 1999 et en 2000 ont eu pour objectif d'évaluer les effets des changements sur les rendements et la productivité.

5 Effets des changements : diagnostic des hivernages 1999 et 2000

Au cours des hivernages 1999 et 2000, le rendement potentiel (simulé avec OryzaS) a atteint 8,8 à 9,2 t/ha, alors que le rendement moyen a fortement augmenté jusqu'à 7,2 t/ha en 1999 et 8,2 t/ha en 2000. Néanmoins, l'écart-type autour de cette moyenne a également augmenté (1,4 t/ha en 1999 et 1,8 t/ha en 2000), ce qui montre l'hétérogénéité persistante entre les parcelles.

5.1 Gestion de l'irrigation

En hivernage 1999, l'irrigation a consommé 78 100 m³ d'eau de plus qu'en 1998 (tableau 1). Cette augmentation est due principalement à la pré-irrigation. La mise en eau a consommé 8 700 m³ d'eau de moins et l'irrigation après mise en eau a consommé 16 700 m³ de plus qu'en 1998. La quantité totale d'eau apportée s'est élevée à 961 mm (10 mm de plus qu'en 1998) alors que l'évapotranspiration du riz a été évaluée à 774 mm (28 mm de moins qu'en 1998). L'hétérogénéité d'apport d'eau entre les parcelles a fortement diminué (l'écart-type est passé de 110 mm à 72 mm) car les agriculteurs ont bien respecté les nouvelles règles de tour d'eau et les parcelles ont toutes été irriguées 8 ou 9 fois après la mise en eau. Néanmoins, cette homogénéisation des fréquences d'irrigation n'a pas conduit à une forte augmentation de la consommation d'eau. En hivernage 2000, les agriculteurs n'ont pas réalisé de pré-irrigation ; ils ont respecté les nouvelles règles de tour d'eau et le planning d'irrigation ; les parcelles ont toutes été irriguées 8 ou 9 fois après la mise en eau.

L'augmentation de la fréquence d'irrigation a réduit le risque d'assèchement de la lame d'eau et le risque de stress hydrique. Les résultats obtenus en 1998 (tableau 2) montrent que l'augmentation de fréquence d'irrigation ne peut à elle seule expliquer l'augmentation de rendement obtenue avec la variété Jaya (2,4 t/ha en 1999 et 3,4 t/ha en 2000). L'amélioration de la gestion de l'irrigation n'est donc pas le seul facteur expliquant l'augmentation des rendements.

5.2 Préparation du sol, mise en eau et semis

En 1999 et en 2000, les agriculteurs ont choisi de retarder les semis pour être sûrs de récolter après la période pluvieuse d'octobre, tout en maintenant un risque de stérilité des épillets inférieur à 15 %. En 1999, la plupart des agriculteurs ont choisi la variété Jaya et utilisé des semences issues de la récolte précédente ; avec un semis entre le 7 et le 22 juillet, la maturité est apparue début novembre (figure 3). En 2000, ils ont en majorité choisi la variété Sahel 202 et semé des semences certifiées ; la période de semis s'est étalée du 19 juillet au 4 août et la maturité est apparue fin novembre (figure 4). Les taux de stérilité simulés avec RIDEV dans toutes les parcelles pour les deux années sont restés inférieurs à 10 %.

Les agriculteurs ont bien respecté en 1999 et en 2000 les prévisions pour la période de semis (figures 3 et 4). Le calendrier prévoyait une mise en eau trois jours avant le semis, mais les agriculteurs ont eu la possibilité de réaliser le semis le jour de la mise en eau. La préparation du sol au pulvérisateur à disques a été réalisée deux jours avant la mise en eau en 1999 et une semaine avant en 2000 ; dans les deux cas, elle a duré trois ou quatre jours pour l'ensemble du périmètre. Ces décalages entre les calendriers prévisionnel et réel du travail du sol et de la mise en eau n'ont pas eu de conséquences sur les chantiers suivants.

En 1999, les paysans ont réalisé la pré-irrigation environ deux semaines avant la période prévue pour être tout à fait sûrs que les adventices lèvent avant la préparation du sol. Les mauvaises herbes ont été éliminées par le travail du sol environ un mois après la pré-irrigation. Après le semis, le développement précoce des mauvaises herbes a été très limité. Cela a incité les agriculteurs à économiser un désherbage chimique. Malgré son efficacité sur le contrôle des adventices et son faible coût (environ 1 000 litres de gas-oil, soit 66 000 MRO pour 27,5 ha), la technique de pré-irrigation est peu utilisée dans la vallée du Sénégal et les agriculteurs de Nakhlet n'ont pas renouvelé cette technique en 2000. La pré-irrigation suppose que les paysans soient présents environ un mois avant le démarrage de la campagne ; mais, à ce moment là, ceux-ci ont d'autres occupations que l'agriculture irriguée (Diemer et van der Laan, 1987).

5.3 Désherbage et fertilisation

En hivernage 1999, l'infestation précoce par les adventices a été faible et les paysans ont choisi d'économiser le coût de l'herbicide (environ 150 000 MRO pour l'ensemble du périmètre) en réalisant un désherbage manuel (tableau 3). Le désherbage a démarré 25 jours après semis (figure 3), mais dans certaines parcelles, il s'est prolongé jusqu'au 13 septembre, ce qui a retardé d'autant le premier apport d'engrais. La note d'enherbement au stade de l'initiation paniculaire a été en moyenne plus faible qu'en 1998, mais l'écart-type a été plus élevé, ce qui indique une plus forte variabilité entre les parcelles liée à l'étalement du désherbage.

En 2000, les agriculteurs ont réalisé un désherbage chimique comme en 1998 (figure 4). En moyenne, le désherbage a eu lieu six jours après la date prévue. Ce retard est en partie lié à la livraison des herbicides et de l'engrais le 19 août ; le désherbage des parcelles semées avant le 29 juillet a été inévitablement retardé (la date optimale du désherbage se situait 20 jours après semis). Le retard du désherbage a entraîné un retard pour le premier apport d'engrais. L'enherbement à l'initiation paniculaire a été peu important (note moyenne inférieure à 1) sauf dans les parcelles semées avant le 29 juillet (note moyenne = 1,8).

En 1999 et en 2000, les agriculteurs ont commandé 3 tonnes de DAP (18 % N, 20 % P) et 5,5 tonnes d'urée, mais les fournisseurs ne disposaient d'aucun engrais phosphaté et finalement ce sont 8,5 tonnes d'urée qui ont été livrées et distribuées aux paysans à raison de 300 kg/ha. La dose totale moyenne d'azote apporté a été 152 kg/ha en 1999 et 2000, avec un écart-type de 20 kg/ha. La dose d'azote apportée, plus importante comparée à celle de 1998, ne peut à elle seule expliquer l'augmentation de rendement car il n'y a pas de corrélation entre la dose d'azote apportée et le rendement obtenu en 1999 et 2000.

Comme en 1998, l'engrais a été fractionné en deux apports égaux, un premier apport 23 jours après semis et un second apport 56 jours après semis en 1999 et 58 jours après semis en 2000 (figures 3 et 4). L'écart moyen entre la réalisation et la prévision est pour le premier apport de 9 jours en 1999 et 6 jours en 2000, et pour le second apport de 2 jours en 1999 et 4 jours en 2000. Le retard du premier apport est plus important que pour le second à cause du cumul avec le retard du désherbage. Ces retards ont été néanmoins significativement réduits (test de Fisher, $p < 0,05$) en comparaison avec la campagne 1998. Mais, comme en 1998, ces retards ont conduit à une forte réduction du rendement maximum (figure 5). Par ailleurs, les rendements mesurés dans les échantillons surestiment le rendement réel des parcelles, ce qui explique que ces valeurs soient supérieures aux rendements

potentiels simulés avec OryzaS. Néanmoins, ces rendements mesurés montrent que les rendements potentiels de Jaya et de Sahel 202 ont été atteints dans de nombreuses parcelles.

5.4 Récolte

Les agriculteurs ont récolté leurs parcelles « dans les temps », légèrement après la maturité physiologique. En 1999, la récolte a été manuelle, le rendement moyen obtenu est de 7,2 t/ha ; en 2000, les paysans ont fait appel à une moissonneuse batteuse et le rendement moyen a atteint 8,2 t/ha.

5.5 Marge brute dégagée

En hivernage 1998, la marge brute dégagée à l'échelle du périmètre (hors la rémunération de la main-d'œuvre et les frais de récolte) s'est élevée à environ 3,7 millions de MRO (tableau 3). En 1999, la marge brute est passée à 6,9 millions de MRO et, en 2000, à 7,5 millions de MRO, soit le double de celle dégagée en 1998. De plus, à part l'introduction de la pré-irrigation, les changements organisationnels n'ont pas eu d'impact sur la quantité de travail : les périodes d'intervention ont été modifiées, mais pas la durée des chantiers.

L'augmentation de la marge brute est essentiellement due à l'augmentation de la production de paddy liée à l'accroissement des rendements. En effet, en comparaison avec 1998, les coûts de production ont légèrement baissé en 1999 (le surcoût de la pré-irrigation a été largement compensé par l'économie d'herbicide) et ils ont augmenté en 2000 à cause de l'utilisation de semences certifiées et de la hausse du prix du gas-oil. Des résultats similaires ont été obtenus par l'ADRAO sur des périmètres privés exploités individuellement par de gros agriculteurs (Haefele *et al.*, 2001).

A l'échelle des parcelles, la marge brute par hectare s'est étagée entre 50 MRO et 250 103 MRO en 1998, entre 50 et 375 103 MRO en 1999 et entre 100 et 400 103 MRO en 2000 (figure 6). L'accroissement de la marge brute par hectare est hautement significatif ($p < 0,0001$, test de comparaison multiple de Scheffé). De plus, en 2000, dans les parcelles semées après le 29 juillet, qui n'ont donc pas subi l'effet du retard de livraison des herbicides et de l'engrais, la marge brute par hectare s'est étagée entre 250 et 400 10³ MRO, soit très au-dessus de la répartition de 1998. La récolte à la moissonneuse batteuse a coûté environ 40 000 MRO par hectare ; cette dépense supplémentaire a pu aisément être prise en charge par les agriculteurs en 2000.

6 Conclusion

Malgré des conditions de croissance similaires à l'intérieur du périmètre, l'écart entre le rendement réel et le rendement potentiel s'est étagé de 1,6 à 5,8 t/ha en 1998. La faible fréquence d'irrigation combinée à des retards pour le désherbage et les apports d'engrais peut expliquer ces pertes de rendement. Par ailleurs, les deux variétés semées (Jaya et Sahel 108) ont permis, malgré des potentiels voisins, des rendements différents : des rendements plus faibles avec Sahel 108 et des semences certifiées, des rendements plus élevés avec Jaya et des semences produites par les agriculteurs. Une fréquence d'irrigation plus faible, une infestation plus forte par les adventices (liée à une fréquence d'irrigation plus faible) et des retards plus importants sur le second apport d'azote expliquent les rendements plus faibles obtenus avec la variété Sahel 108.

A partir de ce diagnostic, nous avons proposé aux paysans de Nakhlet d'une part de changer leurs règles de tour d'eau pour homogénéiser la fréquence d'irrigation et d'autre part de construire un calendrier cultural prévisionnel pour améliorer le calage des interventions culturales. En 1999 et en 2000, toutes les parcelles ont été irriguées 8 ou 9 fois après la mise en eau et les retards d'application des engrais ont été diminués. Le rendement moyen a atteint 7,2 t/ha en 1999 et 8,2 t/ha en 2000, tandis que les coûts de production sont restés stables. Comparée à 1998, la marge brute a ainsi pu augmenter de plus de 80 %. Cet accroissement de productivité est essentiellement dû à une meilleure

organisation collective qui a permis une meilleure efficacité des interventions culturelles et des intrants agricoles.

Ces résultats confirment ceux obtenus par l'ADRAO à l'échelle de toute la région du Sahel en matière de conduite de la riziculture irriguée (Wopereis *et al.*, 2001). Les techniques culturelles actuellement vulgarisées permettent d'atteindre les rendements potentiels des variétés disponibles, lesquels sont déjà très élevés (environ 10 t/ha). Mais l'organisation collective à l'échelle du périmètre et les pratiques individuelles à l'échelle de la parcelle ne sont souvent pas optimales : les doses d'engrais et d'herbicides sont voisines de celles recommandées, mais les périodes d'intervention sont très souvent retardées, ce qui réduit l'efficacité des apports. La construction d'un calendrier cultural prévisionnel permet d'améliorer la gestion de ces interventions.

Dans de nombreuses régions du monde, la gestion des cultures, notamment la fertilisation, ne dépend pas seulement des choix des agriculteurs, mais ceux-ci sont influencés par d'autres acteurs, comme les fournisseurs d'intrants agricoles ou les prestataires de service. Dans notre étude, la gestion de la fertilisation phosphatée a fortement été contrainte par la disponibilité d'engrais sur le plan national (la Mauritanie produit pourtant des phosphates...) et le retard de livraison des herbicides a eu des conséquences importantes sur les résultats. Dans le delta du Sénégal, Le Gal (1997) a démontré l'importance de la disponibilité des moissonneuses-batteuses pour la réalisation de la double riziculture (deux cycles annuels de riz irrigué). L'élaboration d'un calendrier cultural prévisionnel permet de contractualiser de façon précoce les relations avec les fournisseurs et les prestataires de services.

La conception de CalCul correspond bien à la façon dont Keating et McCown (2001) proposent de décomposer un *farming system* : un système de production biophysique d'une part, piloté par un système de gestion d'autre part. De la même manière, le logiciel CalCul associe des connaissances purement agronomiques d'une part (le modèle de simulation de développement du riz irrigué) à des connaissances sur les modes de gestion des riziculteurs sahéliens d'autre part. Le but de CalCul n'est pas, comme APSIM (Keating *et al.*, 2003) ou Déciblé (Chatelin *et al.*, 2005) de simuler l'effet d'un mode de conduite de la culture sur son rendement. Son fonctionnement est donc beaucoup plus simple puisqu'il n'y a pas d'interaction entre la gestion des interventions et le modèle agronomique. Néanmoins, la démarche utilisée avec CalCul correspond à l'approche FARMSCAPE (Carberry *et al.*, 2002) : une recherche participative avec les agriculteurs et leurs conseillers agricoles, qui associe suivi, diagnostic et réflexions, fondées sur des simulations et sur la gestion collective de l'aménagement. En accord avec ce type de démarche, la simplicité du simulateur (simplicité dans la façon dont la solution est obtenue) peut être un atout ; sa facilité de prise en main et d'utilisation permet aux agriculteurs et aux conseillers agricoles de devenir maîtres de la démarche d'aide à la décision.

Références bibliographiques

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italie. 300 p.

Asch F., Wopereis M.C.S., 2000. Responses of field-grown irrigated rice cultivars to varying levels of flowwater salinity in a semi-arid environment. *Field Crops Research*, 70 : 127-137.

Bos M.G., Replogle J.A., Clemmens, A.J., 1991. Flow Measuring Flumes for Open Channel Systems. American Society of Agricultural Engineers, New York, Etats-Unis, ISBN 09293551156, 321 p.

Cantrell R.P., Hettel G.P., 2004. New challenges and technological opportunities for rice-based production systems for food security and poverty alleviation in Asia and the Pacific. In: Rice in global markets and sustainable production systems, International Year of Rice, FAO Rice Conference, 12-13 février 2004, Rome, Italie.

- Carberry P.S., Hochman Z., McCown R.L., Dalglish N.P., Faele M.A., Poulton P.L., Hargreaves J.N.G., Hargreaves D.M.G., Cawthray S., Hillcoat N., Roertson M.J., 2002. The FARMSCAPE approach to decision support: farmers', advisers', reserchers' monitoring, simulation, communication and performance evaluation. *Agricultural Systems*, 74 : 141-177.
- Chatelin M.H., Aubry C., Poussin J.C., Meynard J.M., Massé J., Verjux N., Gate P., Le Bris X., 2005. DéciBlé, a software package for wheat crop mangement simulation. *Agricultural Systems*, 83 : 77-99.
- Defoer T., Wopereis M.C.S., Jones M.P., Lancon F., Erenstein O., Guei R.G., 2004. Challenges and technical opportunities for rice-based production systems for food security and poverty alleviation in sub-Saharan Africa. In: *Rice in global markets and sustainable production systems*, International Year of Rice, FAO Rice Conference, 12-13 février 2004, Rome, Italie.
- Diemer G., van der Laan E., 1987. L'irrigation au Sahel: la crise des périmètres irrigués et la voie haalpulaar. Karthala/CTA, Paris/Wageningen, France, Pays Bas, ISBN 2 86537 193 X, 226 p.
- Dingkuhn M., Le Gal P.Y., Poussin J.C., 1995. RIDEV, un modèle de développement du riz pour le choix des variétés et des calendriers. In : Boivin P., Dia I., Lericollais A., Poussin J.C., Santoir C., Seck S.M. (Eds), Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal, Editions de l'ORSTOM, Coll. Colloques et Séminaires, Paris, ISBN 2 7099 1272 4, p. 205-222.
- Dingkuhn M., Miézan K.M., 1995. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. II. Validation of photothermal constants and characterization of genotypes. *Agricultural Systems*, 48 : 411-434.
- Dingkuhn M., Sow A., 1997. Potential yields of irrigated rice in the Sahel. In : Miézan K.M., Wopereis M.C.S., Dingkuhn M., Deckers J., Randolph T.F. (Eds), *Irrigated rice in the Sahel : Prospects for sustanaible development*. WARDA, Bouaké, Côte d'Ivoire, ISBN 92 9113 1091, p. 361-379.
- Dobermann A., Cassman K.G., Sta. Cruz P.C., Neue H.U., Skogley E.O., Pampolino M.F., Adviento M.A.A., 1995. Dynamic soil tests for rice. In: *Fragile Lives in Fragile Ecosystems*. Proceedings of the International Rice Research Conference, 13-17 février 1995. International Rice Research Institute, Manila, Philippines, p. 343-365.
- FAO, 1986. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. UN-FAO, Rome, Italie. 193 p.
- Haefele S.M., Wopereis M.C.S., Donovan C., Maubuisson J., 2001. Improving the productivity and profitability of irrigated rice production in Mauritania. *European Journal of Agronomy*, 14 : 181-196.
- Keating B.A., McCown R.L., 2001. Advances in farming systems analysis and intervention. *Agricultural Systems*, 70 : 555-579.
- Keating B.A., Carberry P.S., Hammer G.L., Probert M.E., Robertson M.J., Holzworth D., Huth N.I., Hargreaves J.N.G, Meinke H., Hochman Z., McLean G., Verbug K., Snow V., Dimes J.P., Silburn M., Wang E., Brown S., Bristow K.L., Asseng S., Chapman S., McCown R.L., Freebairn D.M., Smith J.C., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming system simulation. *Agricultural Systems*, 18 : 267-288.
- Le Gal P.Y., 1997. Le développement de la double culture irriguée au Sahel: contraintes et perspectives pour les agriculteurs. In : Miézan K.M., Wopereis M.C.S., Dingkuhn M., Deckers J., Randolph T.F. (Eds), *Irrigated rice in the Sahel : Prospects for sustanaible development*. WARDA, Bouaké, Côte d'Ivoire, ISBN 92 9113 1091, p. 161-189.
- Le Gal P.Y., Papy F., 1998. Co-ordination processes in a collectively managed cropping system: double cropping of irrigated rice in Senegal, *Agricultural Systems*, 57 : 135-159.
- Poussin J.C., 1995. Gestion technique de la riziculture irriguée. In : P. Boivin, I. Dia, A. Lericollais, J.C. Poussin, C. Santoir S.M. Seck (Eds), Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne

vallée du Sénégal, Editions de l'ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, Paris, France, ISBN 2 7099 1272 4. p. 153-170.

Poussin J.C., 1997. Direct seeding or transplanting ? An example from the Senegal middle valley. In : Miézan K.M., Wopereis M.C.S., Dingkuhn M., Deckers J., Randolph T.F. (Eds), *Irrigated rice in the Sahel : Prospects for sustainable development*. WARDA, Bouaké, Côte d'Ivoire, ISBN 92 9113 1091, p. 191-200.

Poussin J.C., 2000. CalCul : un outil pour construire un calendrier cultural prévisionnel du riz irrigué au Sahel. In : Legoupil J.C., Dancette C., Godon P., Maïga I.M., N'Diaye M.K. (Eds), *Pour un développement durable de l'agriculture irriguée dans la zone Soudano-Sahélienne. Synthèse des résultats du Pôle régional de recherche sur les systèmes irrigués (PSI/CORAF)*. WECARD-CORAF, Dakar, Sénégal, ISSN 0851 0296. p. 87-99.

Poussin J.C., Wopereis M.C.S, Debouzie D., Maeght J.L., 2003. Determinants of irrigated rice yield in the Senegal River valley. *European Journal of Agronomy*, 19: 341-356.

Raes D., Sy B., Deckers J., 1997. Simulation of irrigation water requirements of rice schemes in the Senegal river delta and valley. In : Miézan K.M., Wopereis M.C.S., Dingkuhn M., Deckers J., Randolph T.F. (Eds), *Irrigated rice in the Sahel : Prospects for sustainable development*. WARDA, Bouaké, Côte d'Ivoire, ISBN 92 9113 1091, p. 411-419.

SAED, 1997. Recueil des statistiques de la vallée du fleuve Sénégal, annuaire 1995/1996, version détaillée. Ministère de l'Agriculture, SAED, St Louis, Sénégal, 142 p.

Sanchez P.A., 1976. *Properties and management of soils in the tropics*. New York, Etats-Unis., ISBN 0 471 75200 2. 618 p.

Siddeek F.Z., Dillaha T.A., Loganathan G.V., 1988. Water management for lowland rice irrigation. *J. of Irrigation and Drainage Div., ASCE* 114 (3) : 407-423.

Smith M., Allen R. G., Monteith J. L., Perrier A., Pereira L., Segeren A., 1992. Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. UN-FAO, Rome, Italie, 54 p.

SONADER, 1998. Etude de la filière riz en Mauritanie. Rapport définitif. SONADER, République islamique de Mauritanie, Nouakchott et CLG Consultants, Paris, France, 132 p.

Tantawi B.A., 2004. Rice-based production systems for food security and poverty alleviation in the Near-East and North Africa: New challenges and technological opportunities. In: *Rice in global markets and sustainable production systems*, International Year of Rice, FAO Rice Conference, 12-13 février 2004, Rome, Italie.

Tran D., 2004. Rice and narrowing the yield gap. *International Year of Rice, Fact Sheets*, FAO, Rome, 2 p.

Tuzet A., Perrier A., 1998. Les besoins en eau des cultures: analyse et applications. In: Tiercelin J.R. (Ed.), *Traité d'irrigation. Technique et documentation*, Paris, France, ISBN 2 7430 0244 1. p. 147-256.

WARDA, 1999. Returns to irrigated cultivar in Senegal. *West Africa Rice Research Brief n° 1*, WARDA, Bouaké, Côte d'Ivoire, 2 p.

Wopereis M.C.S., Donovan C., Nebié B., Guindo D., N'Diaye M.K., 1999. Soil fertility management in irrigated rice systems in the Sahel and Savanna regions of West Africa. Part I. *Field Crop Research*, 61 : 125-145.

Wopereis M.C.S, Haefele S.M., Kebbeh M., Miézan K.M., Diack B.S., 2001. Improving the productivity and profitability of irrigated rice production in Sahelian West Africa. In : *Proceedings of the Expert Consultation Meeting on Yield Gap and Productivity Decline in Rice Production at FAO*, Rome, Italie, 5-7 septembre 2000, p. 117-142.

Tableau 3: Résultats économiques du périmètre pour les hivernages 1998, 1999 et 2000

TSP: triple superphosphate (20 % P); DAP: di-ammonium phosphate (18 % N, 20 % P)

	hivernage 1998			hivernage 1999			hivernage 2000		
	quantité (1 or kg)	Prix unitaire (MRO)	Valeur (103 MRO)	quantité (1 or kg)	Prix unitaire (MRO)	Valeur (103 MRO)	quantité (1 or kg)	Prix unitaire (MRO)	Valeur (103 MRO)
Gas-oil	4 100	65	266,5	5 100	66	336,6	4 200	88	369,6
Huile moteur			18,2			24,2			23,8
Salaire du pompiste			64,0			64,0			64,0
Entretien			55,2			66,2			78,7
Coût de l'irrigation			403,9			491,0			536,1
Préparation du sol			132,4			132,9			134,5
Semences auto-produites	2 000	45	90,0	3 000	45	135,0	600	45	27,0
Semences certifiées	1 500	90	135,0				2 280	90	205,2
Herbicides			252,0			74,2			233,4
Urée	7 000	42	294,0	8 500	44	374,0	8 500	45	382,5
Autres engrais (TSP ou DAP)	2 500	38	95,0						
Coût des opérations culturales			998,4			716,1			982,6
Dépenses diverses (transport. etc.)			170,5			194,2			226,6
Coût total			1 652,8			1 481,3			1 825,3
Produit brut	128 500	42	5 397,0	197 000	42	8 274,0	223 000	42	9 366,0
Marge brute			3 744,2			6 792,7			7 540,7

Figure 1. Calendrier culturel prévisionnel à l'échelle du périmètre déterminé à l'aide du logiciel CalCul pour l'hivernage 1999. Les périodes moyennes d'apparition des stades phénologiques du riz sont indiquées en gris clair ; les périodes moyennes de réalisation des interventions sont indiquées en gris foncé. Les dates mini et maxi sont indiquées par '<' et '>' si elle diffèrent des dates moyennes. La préparation du sol doit être terminée au plus tard la veille du début de la mise en eau, et la pré-irrigation doit être réalisée au minimum 20 jours (délais de ressuyage) avant le travail du sol.

NAKHLET : Calendrier Culturel Prévisionnel

Implantation : SEMIS DIRECT avec pré-irrigation (ressuyage 20 jours)

Préparation du sol : 2 jours

Mise en eau : 12 jours

Récolte : 10 jours

On étale les semis selon la durée de la mise en eau (12 jours)

Variété (1ers semis) : Jaya (taux de stérilité des épillets moy.: 1,2%, maxi: 11,5%)

Variété (derniers semis) : Jaya (taux de stérilité des épillets moy.: 1,0%, maxi:14,2%)

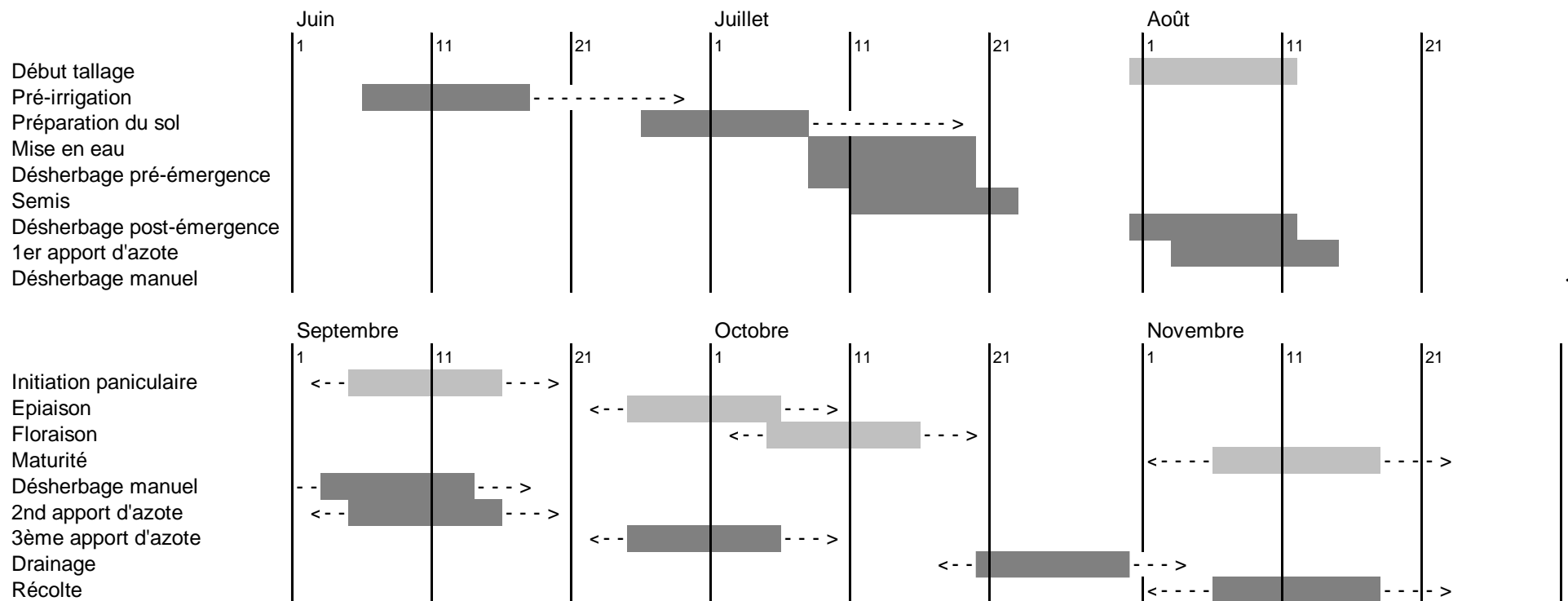
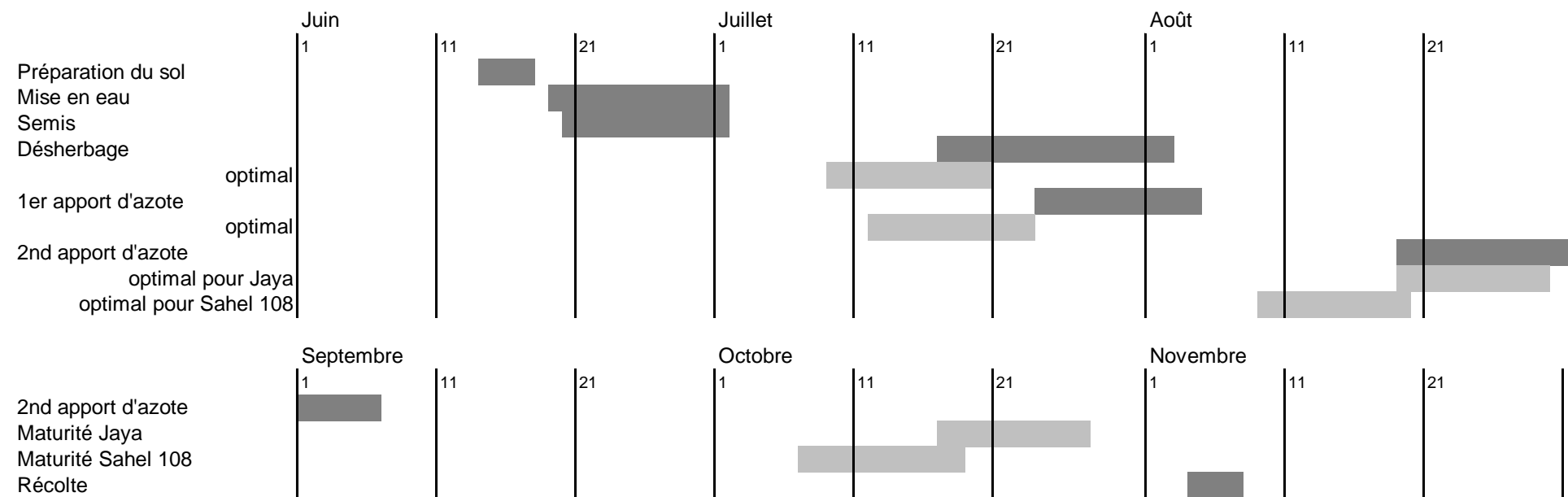


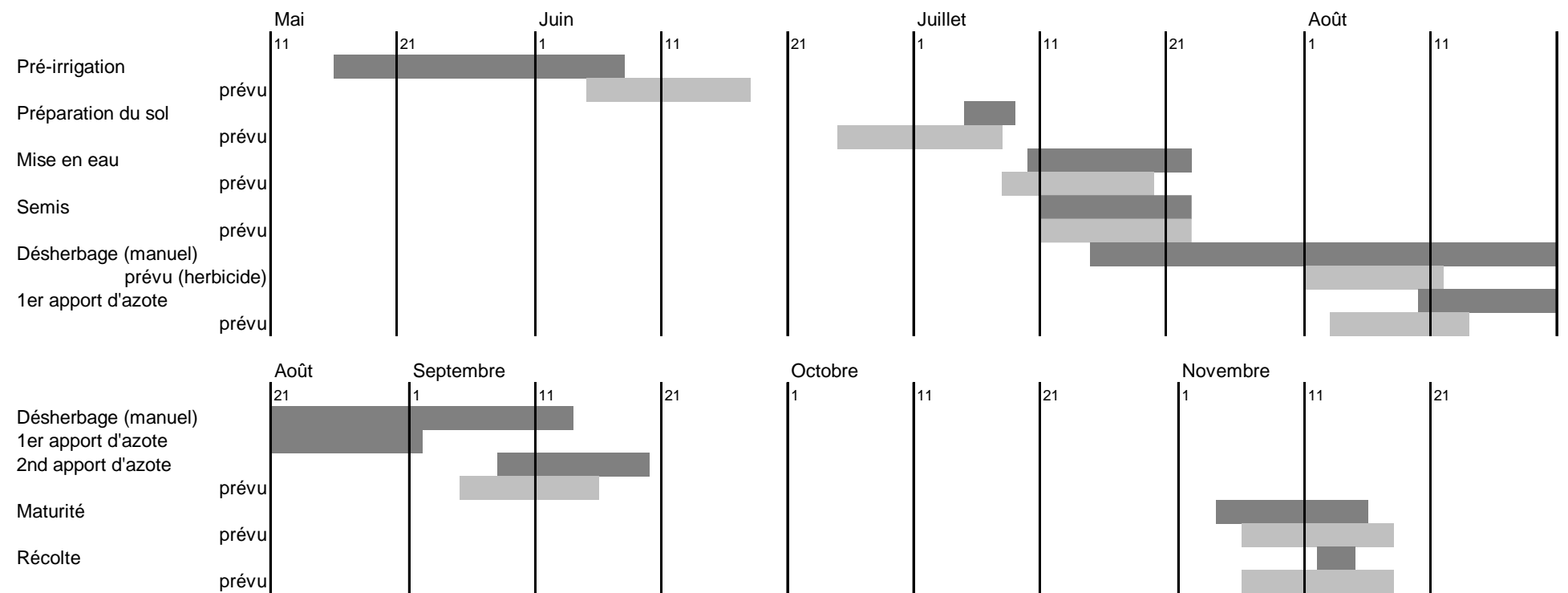
Figure 2. Calendriers culturels réalisés et optimal à l'échelle du périmètre pour l'hivernage 1998. Le calendrier réalisé est indiqué en gris foncé ; le calendrier optimal est indiqué en gris clair. L'infestation par les adventices à l'initiation paniculaire, les variétés et semences utilisées, le type et les doses d'herbicide et d'engrais sont également indiqués.



note d'infestation par les adventices à l'initiation panuculaire : moy. (E.T.) 1,5 (1,2)

Semis	15,0 ha Jaya (semences autoproduites)
	12,5 ha Sahel 108 (semences certifiées)
Désherbage	2 l/ha 2,4 D + 4 l/ha propanil
1er apport d'engrais	100 kg/ha TSP + 125 kg/ha urée
2nd apport d'engrais	125 kg/ha urée

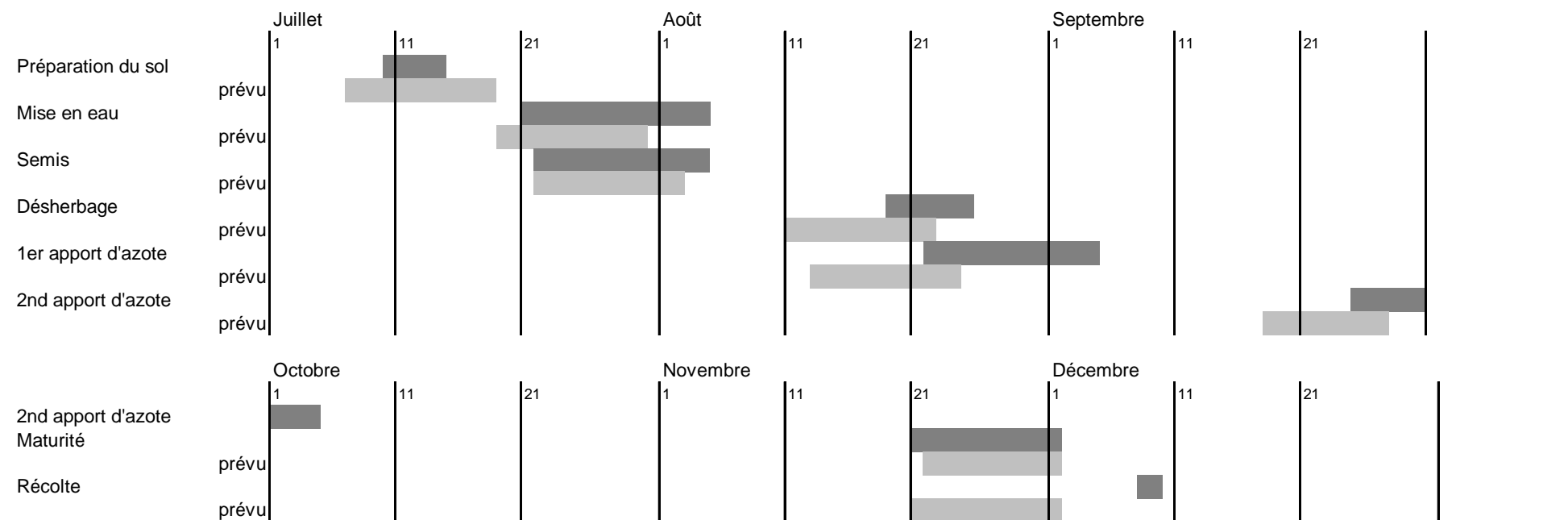
Figure 3. Calendriers culturels prévisionnel et réalisé à l'échelle du périmètre pour l'hivernage 1999. Le calendrier réalisé est indiqué en gris foncé ; le calendrier prévisionnel est indiqué en gris clair. L'infestation par les adventices à l'initiation paniculaire, les variétés et semences utilisées, le type et les doses d'herbicide et d'engrais sont également indiquées.



note d'infestation par les adventices à l'initiation paniculaire : moy. (E.T.) 1,1 (1,6)

	Réalisé	Prévu
Semis	26,6 ha Jaya 0,9 ha Sahel 108	27,5 ha Jaya (semences auto-produites)
Désherbage	manuel	2 l/ha 2,4 D + 4 l/ha propanil
1er apport d'engrais	150 kg/ha urée	100 kg/ha DAP + 50 kg/ha urée
2nd apport d'engrais	150 kg/ha urée	150 kg/ha urée

Figure 4. Calendriers culturaux prévisionnel et réalisé à l'échelle du périmètre pour l'hivernage 2000. Le calendrier réalisé est indiqué en gris foncé ; le calendrier prévisionnel est indiqué en gris clair. L'infestation par les adventices à l'initiation paniculaire, les variétés et semences utilisées, le type et les doses d'herbicide et d'engrais sont également indiquées.



note d'infestation par les adventices à l'initiation panuculaire : moy. (E.T.) 0,8 (1,2)

	Réalisé	Prévu
Semis	22,5 ha Sahel 202 5,0 ha Jaya	27,5 ha Sahel 202 (semences certifiées)
Désherbage	2 l/ha 2,4 D + 4 l/ha propanil	2 l/ha 2,4 D + 4 l/ha propanil
1er apport d'engrais	150 kg/ha urée	100 kg/ha DAP + 50 kg/ha urée
2nd apport d'engrais	150 kg/ha urée	150 kg/ha urée

Figure 5. Rendement (t/ha) des parcelles en hivernage 1998, 1999 et 2000 (1998 [o], 1999 [+], 2000 [x]) en fonction du décalage (en jours) entre la date d'application d'engrais et la date optimale (calculée avec RIDEV) pour les deux apports d'engrais.

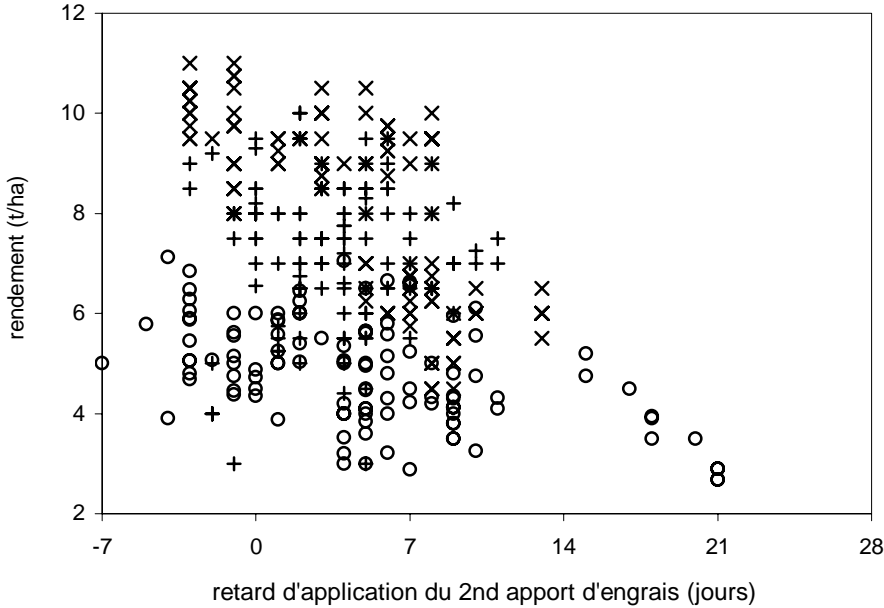
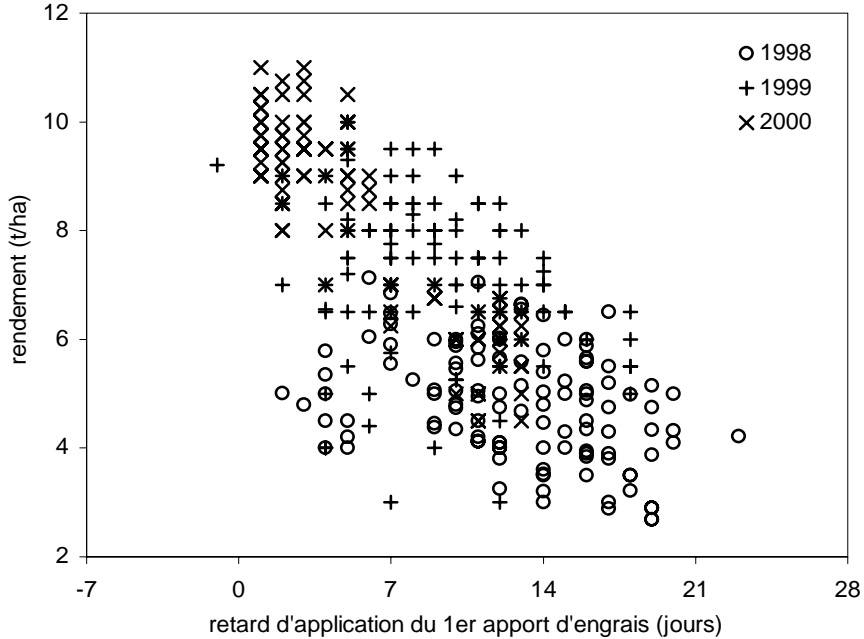


Figure 6. Distribution de la marge brute par hectare dans toutes les parcelles en hivernage 1998, 1999 et 2000.

