

Pratiques paysannes et efficacité d'utilisation de l'azote en riziculture irriguée dans la plaine de Bagré au Burkina Faso

Z. SEGDA^{1,2}, M. BONZI¹, M.S. HAEFELE³, M.C.S. WOPEREIS⁴,
V. HIEN¹, M. P. SEDOGO¹ et S. GUINKO⁵

Résumé

Une caractérisation de l'état de la fertilité du sol avec un accent sur l'efficacité d'utilisation de l'azote (N) en riziculture irriguée a été effectuée durant la saison pluvieuse 2000 dans la plaine de Bagré au Burkina Faso. Les objectifs étaient de déterminer les contraintes chimiques et l'efficacité d'utilisation de N en champs paysans. Le rendement paddy et l'azote absorbé dans les parcelles paysannes sans application de N ont été utilisés pour estimer la capacité nutritive du sol en azote (CNS). La CNS est comprise entre 9 et 102 kg N ha⁻¹. Les doses de N appliquées vont de 64 à 145 kg ha⁻¹, mais l'absence de relation avec la CNS entraîne une grande variabilité et une faible efficacité de l'engrais en milieu paysan. L'efficacité agronomique moyenne varie entre 6 et 34 kg grain kg⁻¹ N. Le taux de recouvrement de N est variable et en général faible (37 % de N appliqué). Les rendements paddy sont cependant fortement corrélés ($r^2 = 0,96$) avec l'azote absorbé à maturité. Un kilogramme d'azote absorbé procure 42 kg de paddy et les rendements varient de 1 à 4,9 t ha⁻¹, soit une moyenne de 3,2 t ha⁻¹). En outre, un rendement additionnel de 9 kg de riz paddy par kg de N appliqué est obtenu dans le cas d'un désherbage opportun. Ces résultats indiquent qu'il est possible d'augmenter les rendements en améliorant l'efficacité d'utilisation des engrais. En outre, l'étude fait ressortir la nécessité d'une gestion spécifique locale des cultures et des éléments nutritifs qui passe par la prise en compte de la capacité nutritive du sol dans l'apport d'éléments minéraux, le timing du désherbage et de l'application de N-engrais.

Mots-clés : efficacité agronomique, engrais azoté, riz irrigué, capacité nutritive du sol.

Farmers' practices and nitrogen use efficiency in Bagré's irrigated rice scheme in Burkina Faso

Abstract

Characterization of soil fertility status with focus on N-use efficiency of irrigated rice has been undertaken in the Bagré's plain in Burkina Faso during the 2000 wet season. The objectives was to determine soil chemical constraints and on-farm N fertilizer-use efficiency. The indigenous soil N supply (INS) was estimated by aboveground crop N uptake and grain yield in plots without applied N established in farmers'

¹ INERA, 04 BP 8645 Ouagadougou 04, Burkina Faso

² Auteur pour correspondance: Tel: + 226 50 31 92 02 – Fax: + 226 50 31 92 06 ; e-mail: zacharie.segda@messrs.gov.bf

³ International Rice Research Institute, DAPO Box 7777, Metro Manila, Philippines

⁴ Un Centre International pour la Fertilité des Sols et le Développement Agricole (IFDC-Division Afrique), BP 4483, Lomé, Togo (adresse actuelle : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement « CIRAD » Montpellier, France)

⁵ Université de Ouagadougou, 03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso.

fields under otherwise favourable growth conditions. Mean INS ranged from 9 to 102 kg N ha⁻¹. Fertilizer N rates varied from 64 to 145 kg ha⁻¹ across farms, but the lack of relationship with INS contributed to relatively low fertilizer N efficiency and high variability in efficiency among farms. Mean agronomic efficiency was only 6-34 kg grain kg⁻¹ N. Fertilizer N recovery was variable and generally low (37% of applied N). Rice yield are however strongly related ($r^2 = 0,96$) to crop N uptake at maturity. One kilogram of N absorbed produces 48 kg of paddy and grain yield ranged from 1,0 to 7,8 t ha⁻¹ (average 3,2 t ha⁻¹). A good weeding gave an additional paddy yield of 9 kg kg⁻¹ N added. These result indicate considerable scope for improved yield and potential for greater fertilizer efficiency by improving congruence between the indigenous soil supply, weeding and fertilizer N application, and emphasise the need for field-specific crop and nutrient management.

Keywords: agronomic efficiency, fertilizer N, irrigated rice, indigenous nutrient supply.

Introduction

L'environnement irrigué au Burkina Faso est essentiellement caractérisé par la monoculture intensive du riz (*Oryza sativa* L.) sur des sols pauvres en matière organique, en azote et en phosphore (NEBIE, 1995). En outre, les stratégies actuelles de gestion de la fertilité des sols dans les systèmes de riziculture irriguée portent sur des « recommandations globales » basées sur les engrais minéraux qui ne tiennent pas compte du type de sol, du précédent cultural, des stades végétatifs, du cycle de la variété, des techniques de préparation du sol et de la saison de culture (OLK *et al.*, 1999 ; DOBERMANN et FAIRHURST, 2000 ; HAEFELE *et al.*, 2002 ; HAEFELE et WOPEREIS, 2002 ; WOPEREIS *et al.*, 2003). Ces recommandations générales aboutissent à de faibles rendements, à de faibles taux de recouvrement des engrais et à des déséquilibres nutritionnels (WOPEREIS *et al.*, 1999).

Pour une utilisation judicieuse et efficiente des fertilisants, la mesure de la capacité du sol à fournir les éléments nutritifs (en particulier l'azote) est pré-requise (JANSSEN *et al.*, 1990) parce que les sols rizicoles varient considérablement dans leur capacité à fournir l'ammonium quand ils sont submergés (SAHRAWAT, 1983) et les excès d'apports exogènes sont source de pertes. La production de biomasse du riz irrigué est principalement liée à la disponibilité en N quand la croissance de la plante n'est pas limitée par la disponibilité en eau, les problèmes d'adventices ou de ravageurs (De DATTA *et al.*, 1988 ; KROPFF *et al.*, 1993). La demande du riz pour les autres éléments nutritifs majeurs dépend aussi principalement de la disponibilité en N (DOBERMANN *et al.*, 1998). Cependant, très peu de données existent sur la gestion efficiente de N et autres éléments nutritifs dans les systèmes de riziculture irriguée en milieu réel au Burkina Faso.

La présente étude se propose d'évaluer d'une part la fertilité naturelle de deux types de sols (argileux et sableux) et d'autre part l'efficacité agronomique des apports d'engrais azotés utilisés par les paysans dans la fertilisation du riz irrigué sur le périmètre de Bagré au Burkina Faso.

Matériel et Méthodes

Zone d'étude

Le périmètre irrigué de l'aval du barrage hydroélectrique et hydroagricole de Bagré se situe dans la province du Boulgou à 150 km au sud-est de Ouagadougou et à 20 km de l'axe routier national n° 16 Tenkodogo - Frontière du Togo. Les coordonnées géographiques de la zone sont

respectivement de 11 °30' de latitude nord et de 0 °25' de longitude ouest.. Selon la subdivision phytoclimatique de GUINKO (1984) qui distingue cinq zones climatiques au Burkina Faso, la zone de Bagré se situe dans le climat Nord soudanien qui intéresse les régions situées entre les parallèles 11 °30' et 14 ° de latitude nord. La pluviométrie moyenne annuelle est de 900 mm. Les températures minimales de l'air en dessous de 15 °C surviennent au cours de la saison sèche froide tandis que les températures de l'air les plus fortes se rencontrent en saison sèche chaude (moyenne de 34,9 °C).

Matériel d'étude

Les sols

Les données disponibles ont été recensées par une étude (BUNASOLS, 1994) qui porte sur 1 050 ha environ en aval du périmètre de Bagré (Bief A et B). Les sols du périmètre irrigué de Bagré sont développés sur des formations alluviales du Quaternaire. Selon la classification de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) 1988, les sols de la rive gauche sont des Gleysols et Fluvisols pour la majorité. La profondeur moyenne des sols se situe entre 40 cm et 120 cm. Ces sols sont dits « lourds » (argileux, limono-argileux) et « légers » (sableux, sablo-limoneux ou gravillonnaires) selon la nomenclature paysanne.

Le matériel végétal

Toutes les variétés de riz utilisées par les producteurs dans notre enquête à Bagré sont des variétés modernes, issues de la création INERA dont des FKR (14, et 19 en particulier).

- FKR 14 (synonyme : 4418), espèce *Oryza sativa*, groupe variétal indica, cycle semis-Épiaison : 95 j, hauteur 119 cm, tallage bon, port de la plante semi retombant, poids de 1 000 grains : 27,72 g, résistance à la verse assez bonne, aristation mutique, résistance à la pyriculariose moyenne, bonne réponse à l'azote, potentiel de rendement : 6 – 7 t ha⁻¹, variété à très bonne qualité du grain usiné, adaptée à la fois aux conditions pluviale, hydromorphe et inondée. Son cycle court en fait la variété idéale pour les bas-fonds à régime hydrique déficitaire.
- FKR 19 : (synonyme : TOX 728-1), espèce *Oryza sativa*, groupe variétal japonica, cycle semis-épiation : 85 j, hauteur : 92 cm, tallage moyen, port de la plante érigé, poids de 1 000 grains : 25,3 g, bonne résistance à la verse, aristation mutique, résistance à la pyriculariose moyenne, réponse à l'azote bonne, potentiel de rendement : 5 – 6 t ha⁻¹, variété à très bonne qualité du grain usiné, adaptée à la fois aux conditions pluviale, hydromorphe et inondée. Son cycle court en fait la variété idéale pour les bas-fonds à régime hydrique déficitaire.

Les engrais

Deux sortes d'engrais minéraux ont été utilisées par les producteurs : « l'engrais coton » (N/P₂O₅/K₂O, 12/24/12) et l'urée (46/0/0).

Méthodes d'étude

Modes d'établissement et fertilisation

Le semis direct en poquet et le repiquage ont été pratiqués par les producteurs de Bagré. La fertilisation comprenait 300 kg ha⁻¹ d'«engrais coton» (N/P₂O₅/K₂O, 12/24/12) en fumure de fond

et 100 kg ha⁻¹ d'urée (46/0/0) en saison pluvieuse ou hivernage (HIV) ou 150 kg ha⁻¹ d'urée en contre saison chaude (CSC) en fumure d'entretien. Ces doses d'engrais fournissent respectivement 82/31/30 kg ha⁻¹ (HIV) et 105/31/30 kg ha⁻¹ (CSC) d'éléments minéraux N, P, et K. L'urée a été apportée en deux fractions à raison de 35 % en début de tallage et 65 % à l'initiation paniculaire.

Méthode d'évaluation de la capacité nutritionnelle du sol

La méthode soustractive a été utilisée pour estimer la capacité nutritionnelle azotée, l'azote étudié étant délibérément extrait de l'engrais appliqué (CASSMAN *et al.*, 1998). Nous avons opté pour un dispositif simple dans lequel les paysans n'appliquent aucun engrais dans une partie de leur champ (DOBERMANN et WHITE, 1999 ; WITT *et al.*, 1999). Le dispositif comprenait deux traitements : (i) les pratiques paysannes sans N (T0) et (ii) les pratiques paysannes avec N (Tp). Chaque parcelle élémentaire avait une superficie de 100 m². Dix paysans ont été choisis par type de sol et de manière à couvrir l'ensemble du périmètre étudié qui s'étend sur une superficie de 106 ha avec 124 exploitants. L'enquête a été effectuée en saison pluvieuse 2000.

Les rendements paddy ont été mesurés sur une surface de 6 m² dans chaque parcelle T0 ou Tp. Le taux d'humidité des grains après séchage était de 14 %. La concentration en N des grains et de la paille a été déterminée à partir du prélèvement de 12 touffes (dans le cas de repiquage) ou sur une superficie de 0,5 m² (semis direct). Les échantillons étaient ensuite séchés à l'étuve à 70 °C jusqu'à humidité constante de 3 %.

Méthodes de calcul de l'efficacité de N engrais

Les paramètres qui ont été utilisés pour l'estimation de l'efficacité d'utilisation de l'azote sont l'efficacité physiologique (Ep), l'efficacité de recouvrement de l'azote (Er) ou coefficient apparent d'utilisation, l'efficacité agronomique de N engrais apporté (Ea), et le facteur de productivité partielle de N engrais apporté (FPP_N).

Efficacité d'utilisation de N engrais ou efficacité physiologique (Ep), exprimée en kilogramme de rendement paddy additionnel (ΔY) par kilogramme d'azote additionnel absorbé (ΔN).

$$Ep = (Y - Y0) / (N - N0) \quad (1)$$

$$Ep = \Delta Y / \Delta N \quad (2)$$

Ep = efficacité physiologique en kg de paddy par kg de N absorbé (kg kg⁻¹ N)

Y = rendement paddy obtenu avec application de N (en kg ha⁻¹)

Y0 = rendement paddy obtenu sans application de N (en kg ha⁻¹)

N = azote absorbé à maturité sur parcelles fertilisées avec N (en kg N ha⁻¹)

N0 = azote absorbé à maturité sur parcelles sans apport de N (en kg N ha⁻¹)

ΔN = augmentation d'azote dans la plante à maturité en kg N ha⁻¹)

ΔY = rendement paddy additionnel (dû à l'apport de N) et exprimé en kg ha⁻¹

L'efficacité de recouvrement de l'azote (Er) ou coefficient apparent d'utilisation est le rapport entre l'augmentation d'azote dans la plante à maturité (N) et la quantité d'azote appliquée (N engrais apporté).

$$Er = (N - N0) / N_{\text{engrais apporté}} \quad (3)$$

$$Er = DN / N_{\text{engrais apporté}} \quad (4)$$

Er = efficacité de recouvrement en kg de N par kg de N_engrais apporté (kg kg⁻¹)
 N = azote absorbé à maturité sur parcelles fertilisées avec N (en kg N ha⁻¹)
 N0 = azote absorbé à maturité sur parcelles sans apport de N (en kg N ha⁻¹)
 ΔN = augmentation d'azote dans la plante à maturité (en kg N ha⁻¹)
 N_engrais apporté = azote appliqué (en kg N ha⁻¹)

L'efficacité agronomique de N_engrais apporté (Ea). C'est le produit de l'efficacité physiologique (Ep) et de l'efficacité de recouvrement (Er), exprimé en kilogramme de rendement paddy additionnel (ΔY) par kilogramme d'azote appliqué (N_engrais apporté)

$$Ea = Ep * Er \quad (5)$$

En remplaçant Ep et Er par leurs valeurs, on aura :

$$Ea \text{ (kg kg}^{-1} \text{ N)} = \Delta Y \text{ (kg ha}^{-1}) / \Delta N \text{ (en kg N ha}^{-1}) * \Delta N / N_{\text{engrais apporté}} \quad (6)$$

Il vient alors :

$$Ea = \Delta Y / N_{\text{engrais apporté}} \quad (7)$$

Le facteur de productivité partielle de N_engrais apporté (FPP_N) est le rapport entre le rendement paddy obtenu avec l'apport de N_engrais (Y) par N_engrais apporté (CASSMAN *et al.*, 1996).

$$FPP_N \text{ (kg kg}^{-1} \text{ N)} = Y / N_{\text{engrais apporté}} \quad (8)$$

Nous avons ensuite analysé l'influence de la période de désherbage en relation avec l'application d'urée sur l'efficacité d'utilisation de N engrais.

Analyses chimiques

Des prélèvements de sols et des analyses chimiques ont été effectués en contre saison sèche 1999. Cinq échantillons de sols ont été prélevés dans chaque parcelle en début de campagne sur l'horizon 0 cm – 20 cm à l'aide d'une tarière avant la préparation du sol. L'échantillon de sol est séché à l'air puis tamisé à 2 mm. Les analyses chimiques ont été effectuées dans les laboratoires de « l'Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest » (ADRAO), actuellement « Le Centre du Riz pour l'Afrique » au Sénégal, de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) et au Bureau national des sols (BUNASOLS) au Burkina Faso. Les analyses ont porté sur le pHeau (1:2,5 d'extrait de sol), la conductivité électrique (CE) d'un extrait 1:5 de sol, le phosphore assimilable P-Bray1 et les bases échangeables (extraction avec de l'ammonium chloride) en utilisant les méthodologies décrites par VAN REEUWIJK (1992). La méthode Walkley-Black (NELSON et SOMMERS, 1982) a été utilisée pour déterminer le carbone total (C). L'azote total (N) a été dosé selon la procédure décrite par BREMMER (1996).

Méthode d'analyse

Les données ont été saisies et traitées sous EXCEL 2000. L'analyse statistique descriptive de base univariée a été effectuée : calcul de la moyenne, de l'écart type et de l'étendue totale de la variable (maximum, minimum).

Résultats

Capacité nutritive du sol

Les sols des parcelles des paysans enquêtés ont été analysés (tableau I). Les sols rencontrés sont d'acidité faible à neutre selon les normes d'interprétation du BUNASOLS (1990) avec un pHeau moyen de 6,60. Les valeurs de la conductivité électrique (CE) sont très faibles (0,05 mS cm⁻¹), indiquant que l'alcalinité ou la salinité ne sont pas des facteurs limitants actuels pour la riziculture irriguée sur la plaine de Bagré. Les valeurs moyennes des éléments majeurs azote (N), phosphore assimilable (P_{ass}) et potassium échangeable (K_{éch}) sont très faibles malgré des taux moyennement élevés de matière organique (moyenne 1,42 %, minima 0,80 % et maxima 3,70 %) et de bases échangeables (4,7 cmol kg⁻¹ de sol à 7,5 cmol kg⁻¹ de sol).

Tableau I. Caractéristiques moyennes de l'horizon superficiel dans les parcelles tests paysannes en contre saison sèche 1999 à Nimatoulaye, Burkina Faso.

Caractéristiques des sols	Type de sols	11 observations Limono argileux		9 observations Sablo limoneux	
		Moyenne	DS	Moyenne	DS
pHeau (extrait de sol 1:2,5)		6,6	0,7	6,6	0,2
CE (1:5 d'extrait de sol)	(mS cm ⁻¹)	0,06	0,03	0,03	0,01
N total	(%)	0,04	0,01	0,05	0,01
Matière Organique	(%)	1,6	1,0	1,2	0,3
C organique total	(g kg ⁻¹ sol)	9,2	5,6	6,9	1,7
Ca échangeable	(cmol _c kg ⁻¹ sol)	4,8	2,6	3,1	0,8
Mg échangeable	(cmol _c kg ⁻¹ sol)	2,1	1,4	1,4	0,7
Na échangeable	(cmol _c kg ⁻¹ sol)	0,3	0,25	0,1	0,03
K échangeable	(cmol _c kg ⁻¹ sol)	0,2	0,13	0,2	0,03
Somme des bases échangeables	(cmol _c kg ⁻¹ sol)	7,5	4,3	4,7	1,4
P total	(mg kg ⁻¹ sol)	137,6	73,7	156,7	117,1
P-Bray1	(mg kg ⁻¹ sol)	4,9	2,5	6,2	3,3

DS = déviation standard

Indicateurs de l'efficacité d'utilisation des engrais

Statistiques descriptives de l'efficacité d'utilisation de l'azote

Les analyses ont fourni des données sur l'ensemble des indicateurs de l'efficacité d'utilisation de N_{engrais} par le riz (tableau II). L'azote absorbé par le riz dans les parcelles sans engrais montre de grandes variabilités se situant entre 9 et 102 kg N ha⁻¹, avec une moyenne à 37 kg N ha⁻¹. La réponse du riz irrigué à Nimatoulaye est de 48 kg ha⁻¹ de paddy par unité de N absorbé et 96 %

des variations de rendement paddy observées sont expliquées par les variations des quantités d'azote absorbées (figure 1). Le facteur de productivité partielle de l'azote (FPP_N) varie de 16 à 52 kg de grain kg^{-1} N appliqué avec une moyenne de 32 kg de grain kg^{-1} N (tableau II). Le taux moyen de recouvrement est de 37 % avec un écart type de 20 % (minimum 13 % et maximum 77 %). Seulement trois exploitants sur douze ont obtenu des taux de recouvrement supérieurs à 50 % tandis que Er varie entre 10 et 50 % pour tous les autres producteurs (tableau II, figure 2). L'efficacité agronomique (Ea) varie de 6 à 34 kg de grain additionnel par kg de N appliqué (moyenne 17 kg kg^{-1}).

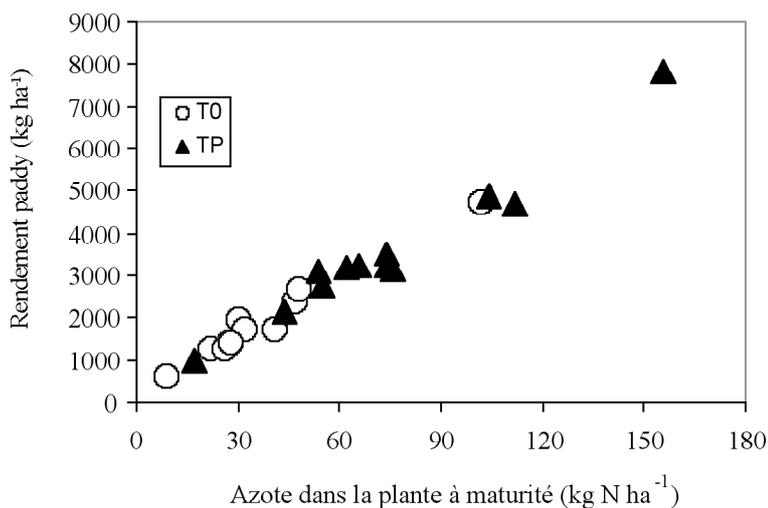


Figure 1. Azote total dans la plante et rendements paysans dans les parcelles fertilisées (Tp) ou non fertilisées (T0) à Nimatoulaye (Bagré), campagne humide 2000.

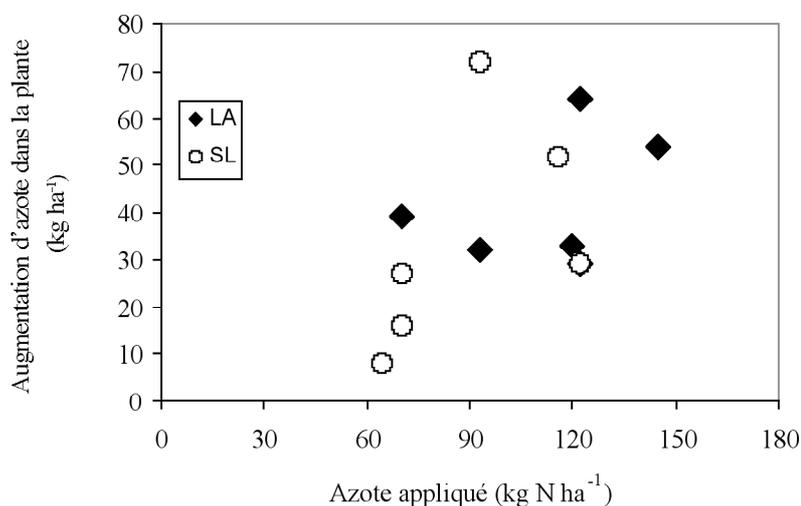


Figure 2. Azote appliqué dans les sols limono argileux (LA) ou sablo limoneux (SL) et augmentation d'azote dans la plante en milieu paysan à Nimatoulaye (Bagré), campagne humide 2000.

Tableau II. Statistiques descriptives de l'efficacité d'utilisation de l'azote à Nimatoulaye saison humide 2000.

Paysan	Rendement	Rendement	Surplus	N_tot_appl	N_abs_T0	N_abs_Tp	Augm_N_plte	Ep	Er	Ea	FPP_N
	T0 (kg / ha)	Tp (kg / ha)	rendement Tp-T0 (kg / ha)	(kg N / ha)	(kg N / ha)	(kg N / ha)	N_Tp - N_T0 (kg N / ha)	(kg grain addit. par kg N abs)	(kg N abs par kg N appl)	(kg grain addit. par kg N appl)	(kg grain Tp par kg N appl)
12	1950	3167	1217	93	30,30	61,70	31,40	39	0,34	13	34
15	4750	7849	3099	145	102,10	156,40	54,30	57	0,37	21	51
13	1750	3525	1775	120	41,10	73,90	32,80	54	0,27	15	29
81350	3239	1889	70	27,00	66,00	39,00	48	0,56	27	46	
16	2400	3158	758	122	47,20	75,90	28,70	26	0,24	6	26
22	1400	3077	1677	70	26,80	53,90	27,10	62	0,39	24	44
21	1750	4870	3120	93	32,00	103,70	71,70	44	0,77	34	52
23	1250	3214	1964	116	21,90	73,50	51,60	38	0,44	17	28
19	1250	2744	1494	122	25,50	54,90	29,40	51	0,24	12	22
72650	4697	2047	122	48,30	112,20	63,90	32	0,52	17	39	
11	1425	2159	734	70	28,20	43,80	15,60	47	0,22	10	31
18	600	1000	400	64	8,60	16,90	8,30	48	0,13	6	16
Observations	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Moyenne	1877	3558	1681	101	36,58	74,40	37,82	46	0,37	17	35
Ecart type	1057	1688	852	27	23,36	36,04	19,05	10	0,18	8	12
Minimum	600	1000	400	64	8,60	16,90	8,30	26	0,13	6	16
Maximum	4750	7849	3120	145	102,10	156,40	71,70	62	0,77	34	52

N_tot_appl. = azote total appliqué ; N_abs_T0. = azote absorbé dans les parcelles non fertilisées ; N_abs_Tp. = azote absorbé dans les parcelles fertilisées ; Augm_N_plte = augmentation d'azote dans la plante ; Ep = efficacité physiologique ; Er = efficacité de recouvrement ; Ea = efficacité agronomique ; FPP_N = facteur de productivité partielle de N ; kg grain addit. = kg de grain additionnel ; kg N_appl. = kg d'azote appliqué.

Effet de la gestion de l'enherbement sur l'efficacité de l'azote engrais

L'analyse de l'efficacité d'utilisation de l'azote en relation avec les périodes de désherbage a été faite (tableau III). L'application d'urée avant le désherbage effectuée en moyenne 26 jours après repiquage (JAR) suivie dans 60 % des cas entraîne un taux de recouvrement de 29 % contre 51% pour ceux qui désherbent avant l'application des engrais comme recommandé par la recherche et la vulgarisation. De ce fait, l'efficacité agronomique va de 12 kg kg⁻¹ (désherbage après engrais) contre 21 kg kg⁻¹ (désherbage avant engrais). Le facteur de productivité partielle de N varie de 26 à 52 kg grain kg⁻¹ N appliqué (moyenne 38 kg kg⁻¹) si le désherbage est effectué avant l'application de l'urée, contre 29 kg kg⁻¹ en moyenne (entre 16 et 39 kg kg⁻¹) lorsque le désherbage est réalisé après l'application de l'urée.

Cette gestion de l'engrais de couverture en liaison avec l'entretien du champ influence le rendement paddy qui va de 2,9 t ha⁻¹ (entre 1,0 et 4,6 t ha⁻¹) pour le désherbage après l'urée contre 3,6 t ha⁻¹ (entre 3,2 et 4,9 t ha⁻¹) pour le désherbage avant l'application de l'urée.

Tableau III. Influence de la période de désherbage sur l'efficacité d'utilisation de l'azote.

Facteur étudié	Nombre de cas	Moyenne	Ecart type	Minimum	Maximum
Efficacité de recouvrement de N (kg kg⁻¹)					
Urée après le désherbage	4	0,51	0,22	0,24	0,77
Urée avant le désherbage	6	0,29	0,13	0,13	0,52
Efficacité agronomique de N (kg kg⁻¹)					
Urée après le désherbage	4	21	12	6	17
Urée avant le désherbage	6	12	4	6	17
Facteur de productivité partielle de N (kg kg⁻¹)					
Urée après le désherbage	4	38	13	26	52
Urée avant le désherbage	6	29	8	16	39
Rendement paddy (t ha⁻¹)					
Urée après le désherbage	4	3,6	0,8	3,2	4,9
Urée avant le désherbage	6	2,9	1,3	1,0	4,6

Discussion

Capacité nutritive du sol

Les valeurs du pHeau et de la conductivité électrique rencontrées se situent dans des plages favorables au développement du riz irrigué (BUNASOLS, 1990). Le risque de dégradation chimique est moyen si l'on se réfère aux critères établis par BUNASOLS (1990) qui prennent en compte la somme des bases échangeables (SBE) et le pHeau. Les valeurs moyennes rencontrées pour la matière organique et la SBE ont été observées par BUNASOLS (1994) à Bagré. Les sols du périmètre présentent cependant des valeurs très faibles de N, P et K qui peuvent être corrigées par

l'application d'engrais complexe NPK et d'urée. Les valeurs de K échangeables sont très faibles, proches des valeurs critiques en sols de rizières (de 0,1 à 0,4 cmol kg⁻¹ de sol) définies par DOBERMANN *et al.* (1995) et par DOBERMANN et FAIRHURST (2000). La carence en phosphore est caractéristique, les valeurs moyennes de P_{ass}. (4,9 et 6,2 mg P kg sol⁻¹) étant inférieures aux valeurs critiques rapportées dans la littérature (SANCHEZ, 1976 ; DOBERMANN *et al.*, 1995 ; DOBERMANN et FAIRHURST, 2000). HAEFELE (2001) a montré dans la Vallée du Fleuve Sénégal que la disponibilité de P peut devenir un facteur limitant pour la croissance du riz pour des valeurs de P_{Bray1} inférieures à 4 mg kg⁻¹. Cette carence en phosphore pourrait contribuer à une réduction induite du taux de recouvrement de l'azote par la plante. Les pratiques paysannes qui consistent en une exportation quasi totale de la paille de riz du champ sans mesure de compensation peuvent à terme contribuer à réduire la fertilité du sol. L'utilisation accrue de la matière organique doit être encouragée afin de maintenir la fertilité du sol et apporter un supplément d'éléments minéraux. SEGDA *et al.* (2001) ont montré dans la Vallée du Kou (Burkina Faso) que l'application continue des amendements organiques (fumier de ferme, compost, paille de riz) améliorerait la production de riz et l'efficacité des engrais minéraux.

Statistiques descriptives de l'efficacité d'utilisation de l'azote

Les valeurs moyennement élevées de FPP_N obtenues sont relativement correctes avec la variété de riz de bas-fond utilisée (FKR 19 dans 83 % des cas) et dont le potentiel de rendement se situe autour de 5–6 t ha⁻¹ (INERA, 2002). Cependant, les très faibles valeurs observées traduisent la variabilité de cette efficacité. Par exemple en appliquant 70 kg N ha⁻¹, un producteur a obtenu un rendement grain de 3,2 t ha⁻¹ (tableau II), tandis qu'un autre a obtenu seulement 2,7 t ha⁻¹ avec l'application de 122 kg N ha⁻¹. Ces différences s'expliquent par la grande variabilité des taux de recouvrement (efficacité de recouvrement, Er). Les valeurs du FPP_N sont similaires à celles obtenues par CASSMAN *et al.* (1996) pour l'Asie et par WOPEREIS *et al.* (1999) pour l'Afrique de l'Ouest. Van KEULEN et WOLF (1986) obtiennent des valeurs comprises entre 50 et 60 kg de grain kg⁻¹ N appliqué pour les variétés de riz irrigué. L'analyse de l'absorption d'azote montre une relation étroite entre l'azote accumulé à maturité et le rendement grain (figure 1), mais la relation entre l'azote appliqué et l'augmentation d'azote dans la plante est faible et très variable (figure 2). Cette relation montre en outre que l'obtention des rendements élevés est liée à l'amélioration de l'absorption d'azote par la plante, d'où l'importance de l'azote comme élément nutritif majeur dans l'élaboration du rendement du riz. Des résultats similaires ont été obtenus par plusieurs auteurs (ADHIKARI *et al.*, 1999 ; WOPEREIS *et al.*, 1999 ; HAEFELE *et al.*, 2000, 2001). Pour YOSHIDA (1981), une efficacité physiologique moyenne de 50 kg de grains par kg de N absorbé est caractéristique des variétés améliorées de riz se développant dans les conditions de bonne gestion des cultures sous les tropiques. WITT *et al.* (1999) ont estimé en Asie à travers le modèle QUEFTS (QUantitative Evaluation of Fertilizer in Tropical Soils) que pour les variétés améliorées du type indica (index de récolte de 0,50) la dilution maximum de l'azote est de 42 kg grain kg⁻¹ N, tandis que l'accumulation maximum est de 96 kg grain kg⁻¹ N. HAEFELE *et al.* (2003) ont trouvé des valeurs sensiblement égales en Afrique de l'Ouest (48 et 112 kg grain kg ha⁻¹ N respectivement pour la dilution maximum et l'accumulation maximum). L'efficacité physiologique moyenne étant de 48 kg grain kg⁻¹ N, l'on se situe dans cette fourchette. Les efficacités physiologiques faibles et variables observées en milieu paysan peuvent être dues à des déséquilibres nutritionnels, à une mauvaise gestion de l'eau ou à des stress biotiques comme la

stérilité des épillets, les adventices, les ravageurs et les maladies (WITT *et al.*, 1999 ; HAEFELE *et al.*, 2003). De faibles valeurs dues à une déficience en P et K ou à une faible disponibilité des autres nutriments peuvent avoir contribué à réduire l'efficacité d'utilisation de N (CASSMAN *et al.*, 1996). Mais étant donné les fortes quantités de P et K appliquées par les producteurs, la dernière hypothèse semble plus probable.

Cependant, il n'apparaît pas de relation claire entre l'augmentation d'azote dans la plante et la quantité d'azote apportée au cours de la campagne quel que soit le type de sol (figure 2). Cette situation a été rencontrée aux Philippines (CASSMAN *et al.*, 1996) et en Afrique de l'Ouest (WOPEREIS *et al.*, 1999 ; HAEFELE, 2001 ; HAEFELE *et al.*, 2003). Il ressort de cette analyse qu'en moyenne 63 % de l'azote appliqué sont perdus. Il apparaît en outre qu'un kg d'azote appliqué fait gagner en moyenne 35 kg de paddy, c'est-à-dire que la perte de 63 kg d'azote entraîne celle de plus de 2 tonnes de riz paddy pour le producteur. Ces résultats sont similaires à ceux de WOPEREIS *et al.* (1999) qui obtiennent des taux de recouvrement de 50 % (Vallée du Kou au Burkina Faso), de 11 à 75 % (Office du Niger au Mali) et 38 à 66 % au Sénégal. Pour 50 % des exploitants de Bagré, le fait de ne pas enfouir immédiatement l'urée après l'épandage entraîne des pertes importantes d'azote. MIKKELSEN *et al.* (1978) ont montré que les pertes nettes d'azote sont considérablement réduites quand l'engrais est enfoui juste après son application. L'efficacité agronomique faible et variable observée est comparable à celle relevée par d'autres auteurs dont DOBERMANN (2000) qui trouve en Asie une Ea de 10 kg kg⁻¹.

Effet de la gestion de l'enherbement sur l'efficacité de l'azote engrais

Un rendement additionnel de 9 kg de riz paddy par kg de N appliqué est observé si l'on suit les recommandations de la recherche et de la vulgarisation consistant à désherber deux à trois jours avant l'application de l'engrais de couverture. Dans la région rizicole du fleuve Sénégal, HAEFELE *et al.* (2000) obtiennent un surplus de rendement de 0,9 t ha⁻¹ sous une gestion améliorée des fertilisants et 1,1 t ha⁻¹ sous une gestion améliorée des mauvaises herbes. La gestion intégrée des deux composantes (engrais et désherbage) procure un surplus de rendement de 1,8 t ha⁻¹ par rapport à la gestion traditionnelle paysanne. En outre, HAEFELE *et al.* (2001) ont mis en évidence la rentabilité de la culture du riz avec une gestion intégrée des engrais et des mauvaises herbes en Mauritanie. Ces auteurs enregistrent un accroissement de rendement de 85 % par rapport aux pratiques paysannes. Les résultats obtenus à Bagré (l'application d'urée intervenant avant le désherbage au lieu du désherbage avant l'application d'urée) révèlent un déficit de connaissances des méthodes de gestion des adventices en relation avec l'application des engrais de couverture en riziculture irriguée. Une mauvaise gestion provoque une prolifération des mauvaises herbes qui tirent profit des engrais apportés au détriment du riz et conduit à des pertes importantes de rendement. L'application d'urée avant le désherbage réduit l'efficacité de l'engrais. Par contre, la rentabilité des engrais est associée à un désherbage opportun.

Conclusion

Le périmètre irrigué de Nimatoulaye à Bagré présente un niveau de fertilité naturelle moyen avec de très faibles disponibilités en phosphore assimilable, en azote total et en potassium échangeable, une richesse moyenne à faible en matière organique, en bases échangeables. Les valeurs

du pH eau et de la conductivité électrique enregistrées se situent dans des plages favorables au développement du riz irrigué.

L'étude de l'efficacité agronomique de l'azote engrais montre que les rendements sont étroitement liés à l'azote total mobilisé par la plante à maturité; chaque kilogramme d'azote mobilisé par la plante augmente le rendement de 48 kg (s'il n'y a pas d'autres facteurs limitants). Toutefois, aucune relation claire n'existe entre l'azote appliqué et l'augmentation d'azote dans la plante quel que soit le type de sol. Le recouvrement par la plante de l'azote appliqué varie de façon importante, allant de 13 à 77 %, d'où la nécessité de déterminer les causes de la variabilité des taux de recouvrement. Plusieurs producteurs de Nimatoulaye peuvent améliorer leurs rendements sans investissements additionnels en diminuant les pertes d'azote. Le facteur déterminant pour diminuer ces pertes en N est le désherbage avant l'application des engrais. Un rendement additionnel de 9 kg de riz paddy par kg de N appliqué est obtenu dans le cas d'une meilleure gestion des cultures. Une meilleure gestion des cultures (timing des opérations culturales) combinée à une fertilisation minérale appropriée (doses et modes d'application) permet d'améliorer la production et la productivité rizicoles sur ce périmètre sans investissements additionnels.

Remerciements

Nous remercions les producteurs de Nimatoulaye (Bagré) au Burkina Faso pour leur coopération. Cette étude a été partiellement financée par le Ministère fédéral allemand de la coopération économique (BMZ) à travers l'agence allemande de coopération technique (GTZ), par l'Agence Américaine pour le Développement International (USAID) à travers les groupes d'action de l'ADRAO et par l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) du Burkina Faso.

Références citées

- ADHIKARI C., BRONSON K.F., PANUALLAH G.M., REGMI A.P., SAHA P.K., DOBERMANN A., OLK D.C., HOBBS P.R., PASUQUIN E., 1999.** On-farm soil N supply and N nutrition in the rice-wheat system of Nepal and Bangladesh. *Field Crops Research* 64 (3): 273-286.
- BREMMER J.M., 1996.** Nitrogen-Total. In: *Methods of soil analysis. Part 3, Chemical methods.* Bigham, J.M (Ed.), Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, Madison, USA, p. 1085-1122.
- BUNASOLS., 1990.** Manuel pour l'évaluation des terres. Document Technique n° 6, 181 p.
- BUNASOLS., 1994.** Etude pédologique du périmètre irrigué de Bagré (Bagré aval, bief A et B, première tranche), échelle 1/10 000 è. Volume 1: rapport principal, Rapport technique 95, BUNASOLS, Ouagadougou, 75 p.
- CASSMAN K.G., GINES G.C., DIZON M.A., SAMSON M.I., ALCANTARA, J.M., 1996.** Nitrogen-use efficiency in tropical lowland rice systems: contributions from indigenous and applied nitrogen. *Field Crops Research*. 47 (1), 1-12.
- CASSMAN K.G., PENG S., OLK D.C., LADHA J.K., REICHARDT W., DOBERMANN A. SINGH U., 1998.** Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crops Research*. 56, 7-38.
- De DATTA S.K., GOMEZ K.A., DESCALSOTA J.P., 1988.** Changes in yield response to major nutrients and in soil fertility under intensive rice cropping. *Soil Science*. 146: 350-358.
- DOBERMANN A., 2000.** Future intensification of irrigated rice systems. In: *Redesigning rice photosynthesis to increase yield.* Sheehy JE, Mitchell PL, Hardy B. Makati City (Philippines). International Rice Research Institute and Amsterdam (The Netherlands), Elsevier Science B.V. p. 229-247.

DOBERMANN A., CASSMAN K.G., MAMARIL C.P., SHEEHY S.E., 1998. Management of phosphorus, potassium, and sulfur in intensive, irrigated lowland rice. *Field Crops Research* 56: 113-138.

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 February 1995. International Rice Research Institute, Manila, Philippines. p. 343-365.

DOBERMANN A. & FAIRHURST T., 2000. Rice: Nutrient disorders and nutrient management. Singapore, Potash and Phosphate Institute (PPI) and Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC) and Makati City (Philippines): International Rice Research Institute, 191 p.

DOBERMANN A. & WHITE P.F., 1999. Strategies for nutrient management in irrigated and rainfed lowland rice systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystem* 53: 1-18.

DOBERMANN A., WITT C., ABDULRACHMAN S., GINES H.C., NAGARAJAN R., SON T.T., TAN P.S., WANG G.H., CHIEN N.V., THOA V.T.K., PHUNG C.V., STALIN P., MUTHUKRISHNAN P., RAVI V., BABU M., SIMBAHAN G.C., ADVIENTO M.A.A., 2003. Soil fertility and indigenous nutrient supply in irrigated rice domains of Asia. *Agronomy Journal*. 95 (4): 913-923.

FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations), 1988. FAO-UNSECO Soil Map of the World. Revised legend, World Soil Resources Report 60, FAO, Rome.

GUINKO S., 1984. Végétation de la Haute Volta. Thèse de doctorat es Sc., Univ. Bordeaux II, 318 p. + annexes (tome 1 et 2)

HAEFELE S.M. 2001. Improved and sustainable nutrient management for irrigated rice-based cropping systems in West Africa. Ph.D. diss, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 49, Hamburg, Germany, 240 pp.

HAEFELE S.M., JOHNSON D.E., DIALLO S., WOPEREIS M.C.S., JANIN I., 2000. Improved soil fertility and weed management is profitable for irrigated rice farmers in Sahelian West Africa. *Field Crops Research* 66 (2): 101-113.

HAEFELE S.M. & WOPEREIS M.C.S., 2002. Combining field and simulation studies to improve fertilizer recommendations for irrigated rice in the Senegal river valley. In: *Increasing Productivity of Intensive Rice Systems Through Site Specific Nutrient Management*. Dobermann, A., Witt, C., Dawe, D. (Eds.), Science, Moscow/International Rice Research Institute, New Delhi.

HAEFELE S.M., WOPEREIS M.C.S., DONOVAN C., 2002. Farmers' perceptions, practices and performance in a Sahelian irrigated rice scheme. *Journal of Experimental Agriculture* 38: 197-210.

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 (3): 181-196.

HAEFELE S.M., WOPEREIS M.C.S., NDIAYE M.K., BARRO S.E., OULD ISSELMOU M., 2003. Internal nutrient efficiencies, fertilizer recovery rates and indigenous nutrient supply of irrigated lowland rice in Sahelian West Africa. *Field Crops Research* 80 (1): 19-32.

INERA., 2002. Synthèse des activités de recherche sur le riz et la riziculture (1994-2001). INERA, Ouagadougou, Burkina Faso, 129 p.

JANSSEN B.H., GUIKING F.C.T., VAN DER ELJK D., SMALING E.M.A., WOLF J., van REULER H., 1990. A system for Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils (QUEFTS). *Geoderma* 46:299-318.

KROPFF M.J., CASSMAN K.G., VANLAAR H.H., PENG S., 1993. Nitrogen and yield potential of irrigated rice. *Plant Soil* 156: 391-394.

MIKKELSEN D.S., De DATTA S.K., OBCEMEA W.N., 1978. Ammonia volatilization losses from flooded rice soils. *Soil Science Society of America Journal* 42: 725-730.

NEBIE B., 1995. Etude des contraintes agropédologiques déterminant la production du riz irrigué dans la Vallée du Kou au Burkina Faso. Thèse Docteur-ingénieur, Option sciences agronomiques, Faculté des Sciences et Technique, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 209 p.

- NELSON D.W. & SOMMERS L.E., 1982.** Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Methods of Soil Analysis. 2nd Ed. A.L. Page (ed.) ASA Monogr. 9 (2), Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, Madison, USA, p. 539-579.
- OLK D.C., CASSMAN K.G., SIMBAHAN G.C., STA.CRUIZ P.C., ABDULRACHMAN S., NAGARAJAN R., TAN P.S., SATAWATHANANONT S., 1999.** Interpreting fertilizer-use efficiency in relation to soil nutrient-supplying capacity, factor productivity, and agronomic efficiency. Nutrient Cycling in Agroecosystem 53: 35-41
- SAHRAWAT K.L., 1983.** Nitrogen availability indexes for submerged rice soils. Advances in Agronomy 36: 415-451.
- SANCHEZ P.A., 1976.** Properties and management of soils in the tropics. New York, USA, 618 p.
- SEGDA Z., LOMPO F., WOPEREIS M.C.S., SEDOGO P.M., 2001.** Amélioration de la fertilité du sol par utilisation du compost en riziculture irriguée dans la Vallée du Kou au Burkina Faso. Agronomie Africaine 13 (2): 45-58.
- Van KEULEN H. & WOLF J., 1986.** Modeling of agricultural production: Weather, Soils and Crops. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, ISBN 90 220 0858 4, 478 p.
- Van REEUWIJK L.P., 1992.** Procedures for soil analysis, 3rd ed. ISRIC, Wageningen.
- WITT C., DOBERMANN A., ABDULRACHMAN S., GINES H.C., WANG GUANGHUO., NAGARAJAN R., SATAWATHANANONT S., TRAN THUC SON., PHAM SY TAN., LE VAN TIEM., SIMBAHAN G.C, OLK D.C., 1999.** Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. Field Crops Research 63 (2): 113-138.
- WOPEREIS M.C.S., DONOVAN C., NEBIÉ B., GUINDO D., NDIAYE M.K., 1999.** Soil fertility management in irrigated rice systems in the Sahel and Savanna regions of West Africa. Part I. Agronomic analysis. Field Crops Research 61 (2): 125-145.
- WOPEREIS M.C.S., HAEFELE S.M., DINGKUHN M., SOW A., 2003.** Decision-support tools for irrigated rice-based systems in the Sahel. In: Decision support tools for smallholder agriculture in sub-Saharan Africa: A practical guide. Struif Bontkes, T., Wopereis, M.C.S. (eds.), IFDC (An International Center for Soil Fertility and Agricultural Development), P.O. Box 2040 Muscle Shoals, Alabama 45662, USA and ACP-EU Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation (CTA), Postbus 380, 6700 AJ Wageningen, The Netherlands, p. 114-126.
- YOSHIDA S., 1981.** Fundamental of rice crop science. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines, 269 p.