



HAL
open science

Etude à l'aide d'urée enrichie en ^{15}N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar

Jacques Dupuy, Rémi Gaudin, Guido d'Onofrio

► **To cite this version:**

Jacques Dupuy, Rémi Gaudin, Guido d'Onofrio. Etude à l'aide d'urée enrichie en ^{15}N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. *L'Agronomie Tropicale*, 1990, 45 (1), pp.3-30. ird-00464137

HAL Id: ird-00464137

<https://ird.hal.science/ird-00464137>

Submitted on 16 Mar 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude à l'aide d'urée enrichie en ^{15}N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar

I – Comparaison entre supergranules d'urée, perlurée et solution d'urée placés à 1 cm ou 10 cm de profondeur

J. DUPUY (1), G. D'ONOFRIO (2), R. GAUDIN (1)

RÉSUMÉ — Afin d'évaluer le rôle de la structuration et de la profondeur des apports de l'engrais dans la notion de placement, une expérience de fertilisation du riz inondé a été conduite avec de l'urée enrichie en azote 15 présentée sous trois formes, supergranules, perlurée et solution d'urée, et placée à deux profondeurs : 1 cm et 10 cm. En termes de quantités totales de matière sèche des parties aériennes, les supergranules d'urée et la solution conduisent à une production nettement plus élevée que la perlurée d'une part, et le placement profond est plus efficace qu'un apport en surface d'autre part. Cet accroissement des exportations est lié aux coefficients réels d'utilisation de l'azote, qui sont plus importants pour les placements profonds de supergranules d'urée ou de solution que pour leur apport en surface ; ces écarts sont beaucoup plus réduits pour la perlurée. L'obtention de meilleurs résultats pour des placements corrects en profondeur est discutée en termes d'importance relative des pertes superficielles selon la structuration de l'engrais d'une part, et en relation avec la notion de gradient de concentration en NH_4^+ pour des apports localisés à 10 cm d'autre part.

Mots clés : *Oryza sativa*, riz, azote 15, urée, forme, profondeur.

L'importance de la riziculture comme de la tradition rizicole malgache ne sont plus à rappeler. Cependant, les rendements moyens plafonnent à moins de $2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Pour faire face à l'augmentation des besoins, liée à une croissance démographique importante, un développement général de la production est nécessaire. Plusieurs voies peuvent permettre d'y parvenir. Citons l'extension des surfaces cultivées, la sélection variétale, l'amélioration des pratiques culturales et, bien entendu, le recours aux fertilisants.

Dans ce dernier domaine, deux problèmes majeurs se posent. Le premier, d'ordre économique, tient au coût sans cesse croissant des intrants importés ainsi qu'aux difficultés

d'approvisionnement et d'acheminement. Le second est d'ordre agronomique. En effet, si sur de longues périodes, et avec des intrants limités, les rendements restent sensiblement constants, indice d'un système en équilibre, la réponse aux fertilisations minérales est parfois décevante. Ce phénomène, assez général et très sensible pour l'azote, a souvent été évoqué pour d'autres pays rizicoles (DE DATTA, 1981). Aussi, depuis quelques années, plusieurs solutions ont-elles été proposées en vue d'améliorer l'efficacité des engrais azotés en riziculture inondée.

Les plus simples consistent à fractionner les apports (DE DATTA, 1981 ; YOSHIDA, 1981 ; HALL et RAILEY, 1964 ; PRASAD et DE DATTA, 1979 ; SHOJI *et al.*, 1986 ; CRASWELL *et al.*, 1981), mais cette pratique n'est pas toujours commode dans les rizières de bas-fond en cascade, siège d'un ruissellement intense et non maîtrisé en saison des pluies. D'autres méthodes peuvent se révéler plus adaptées. Elles font appel à un placement profond de l'engrais éventuellement associé à des constituants provoquant une libération progressive de l'azote ou à des inhibiteurs de la nitrification (DE DATTA, 1981 ; PRASAD et DE DATTA, 1979 ; ROY, 1985 ; SAVANT *et al.*, 1983 ; SHARMA et PRASAD, 1980 ; MALHI et NYBORG, 1988 ; CAO *et al.*, 1984 ; SUDHAKARA et PRASAD, 1986 ; SAVANT *et al.*, 1982).

L'une des techniques les plus simples et les plus économiques a été introduite à Madagascar par le Programme engrais malgache/FAO (PEM) dans les années 80. Il s'agit simplement de supergranules d'urée (SGU) d'un poids compris entre 1 et 4 g enfouis à 10 cm de profondeur.

Dans une série d'essais multiloceaux réalisés en milieu paysan par le PEM, des courbes de réponse ont été établies. L'un des principaux résultats est l'importance des accroissements de rendement par rapport à la perlurée, de l'ordre de 28 %, obtenus pour la dose relativement faible de 54 kg d'azote à l'hectare (D'ONOFRIO *et al.*, 1985). Cette performance est liée à une meilleure utilisation de l'azote engrais, comme l'ont montré des expériences préliminaires conduites en présence d'azote 15, avec la collaboration de l'AIEA (tableau I). Si la contribution de l'azote engrais (Ndff) par rapport à l'azote total exporté augmente

(1) LRI, service de radioagronomie, BP 3383, Antananarivo 101, Madagascar.

(2) PEM/FAO, direction de la Vulgarisation, MPARA, Antananarivo 101, Madagascar.

TABLEAU 1 Poids de grain ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), taux d'intervention (Ndf) et coefficients réels d'utilisation de l'engrais (CRU)-enrichi en azote 15, présenté sous forme de perlurée (PER) ou de supergranules (SGU) aux doses de 54 et 81 $\text{kg} \text{ N} \cdot \text{ha}^{-1}$ en deux points d'essai (Arivonimamo et Mahitsy) en 1981.

Localisation	Arivonimamo		Mahitsy	
	54	81	54	81
Dose d'engrais ($\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) (SGU + PER)	54	81	54	81
Poids de grain ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	518	526	277	287
Ndf (%)	18,9	23,1	12,6	17,6
CRU (%)	22,1	23,0	14,3	15,2
Forme d'engrais (54 + 81 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$)	PER	SGU	PER	SGU
Poids de grain ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	406	658	261	303
Ndf (%)	10,8	31,2	5,6	24,6
CRU (%)	8,5	36,6	4,2	25,3

légèrement avec la dose, les coefficients réels d'utilisation de l'engrais (CRU) restent sensiblement constants.

L'effet forme d'engrais est beaucoup plus marqué, aussi bien en termes de participation de l'azote de l'engrais et de l'azote du sol qu'en termes d'utilisation de l'engrais, mais les interactions ne sont pas significatives.

Les coefficients réels d'utilisation restent faibles ; aussi une étude plus approfondie de l'effet supergranule a-t-elle été entreprise afin d'améliorer les pratiques d'apport d'engrais en les adaptant aux différentes situations rencontrées.

Dans un premier temps, nous avons cherché à évaluer l'importance relative de deux composantes principales, à savoir, la structuration de l'engrais d'une part, la localisation en profondeur d'autre part.

Matériel et méthode

L'essai mis en place à Antsirabe, sur un sol hydromorphe à pseudogley de surface, comprend trois traitements « forme d'engrais » dosé à 27 unités par hectare : 20 ml d'une solution d'urée à 5 % (SOL), de la perlurée (PER), des supergranules (SGU) de 1 gramme, et deux traitements « profondeur » : en surface (1 cm) dans la zone oxydée, en profondeur (10 cm) dans la zone réduite, à six répétitions.

Les parcelles recevant l'urée marquée (excès isotopique de 2,86 %) ont une surface de 0,64 m^2 , soit un total de 16 touffes (quatre groupes de 4 touffes) ; elles sont entourées par deux rangées de garde soumises au même traitement avec de

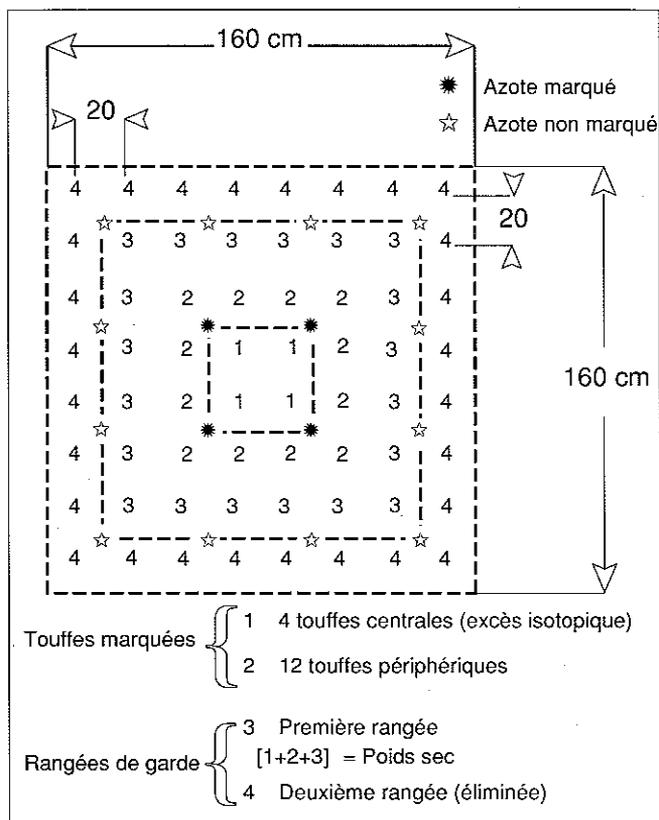


FIGURE 1 : Schéma d'une parcelle.

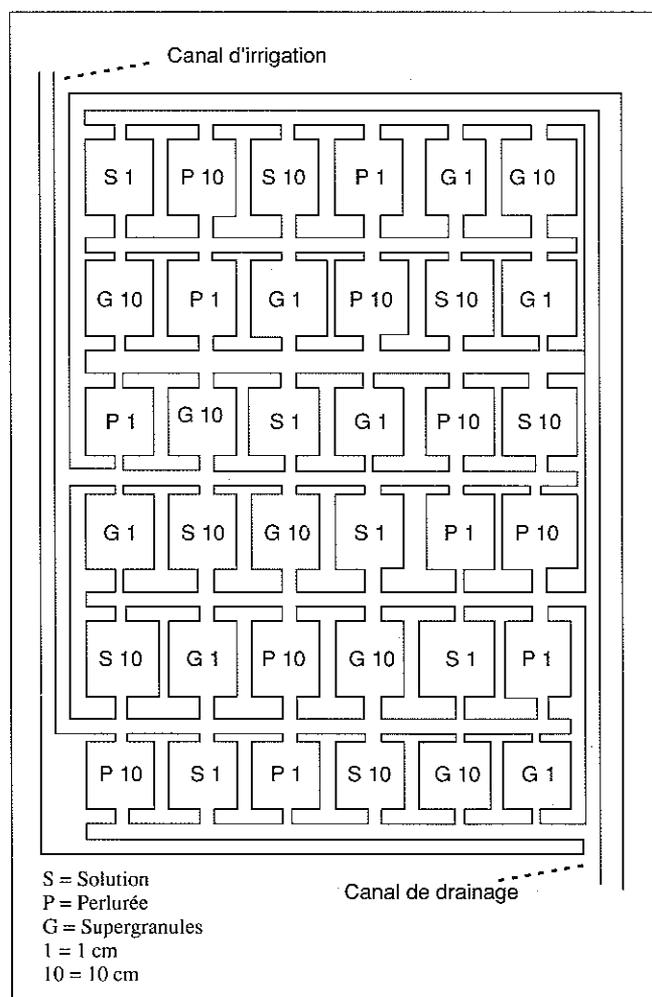


FIGURE 2 : Schéma d'ensemble.

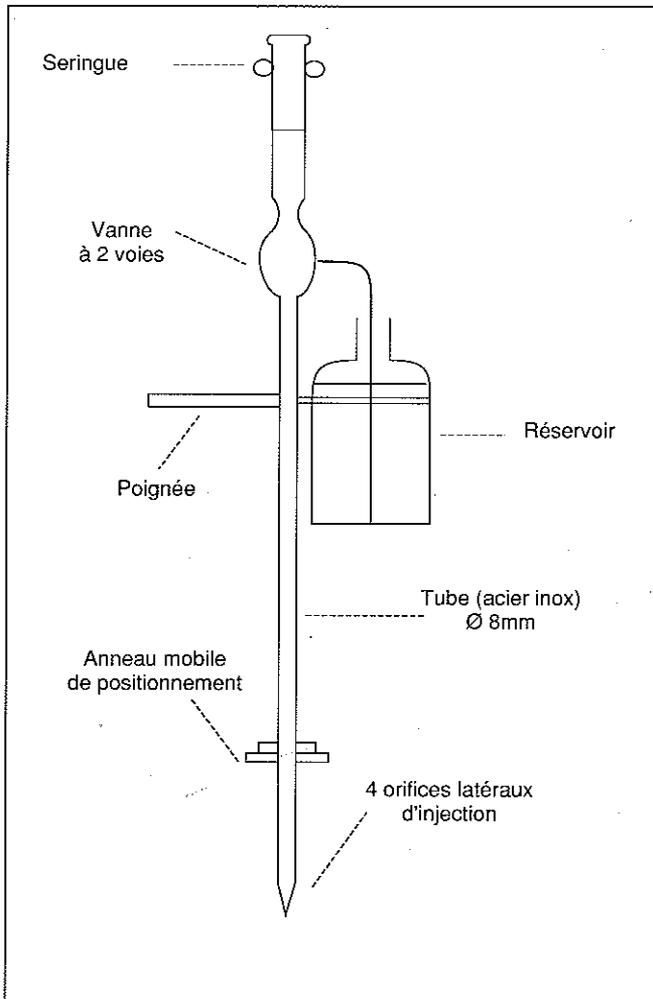


FIGURE 3 : Dispositif d'injection d'urée.

l'azote à teneur naturelle (figure 1). Les parcelles, séparées par des diguettes, sont disposées en carré latin (figure 2).

Le riz, variété Chianan 8 (1632), est repiqué à trois brins âgés de 40 jours, à une équidistance de 20 cm.

La fumure de fond, appliquée au planage, est de 90 unités de P_2O_5 et K_2O .

L'azote est apporté à 21 jours, après drainage, sous forme :

- d'une solution d'urée injectée lentement dans le sol avec le dispositif représenté à la figure 3 ;
- de perlurée placée dans un sillon étroit à la profondeur requise ;
- de supergranules enfouis à l'aide d'un bâton.

Les supergranules marqués sont réalisés en emballant fermement l'urée dans une double enveloppe de papier de soie.

A maturité, les parties aériennes sont récoltées. Les rendements en paille et en grain sont mesurés sur les 16 touffes ayant reçu l'azote marqué et la première rangée de garde après séchage à 60 °C.

La totalité du matériel végétal provenant des 4 touffes centrales est broyée au microbroyeur rotatif. Deux sous-

TABLEAU II Poids de matière sèche ($g \cdot m^{-2}$).

Traitements	Total	Grain	Paille
10	734 A	405 A	329 A
1	659 B	368 B	291 B
SGU	727 A	407 A	321 A
SOL	702 A	386 B	316 A
PER	660 B	367 B	293 B
SGU10	766	426	340 A
SGU01	689	387	302 B
SOL10	758	412	347 A
SOL01	647	361	286 B
PER10	679	379	300 B
PER01	642	355	287 B
M	697	387	310
ETR	34,86	23,28	15,43
ETM	17,43	11,64	7,72

M : moyenne ; ETR : écart-type résiduel ; ETM : écart-type des moyennes.

TABLEAU III Quantités d'azote ($g \cdot m^{-2}$).

Traitements	Total	Grain	Paille
10	5,87 A	4,10 A	1,77 A
1	5,33 B	3,79 B	1,54 B
SGU	5,78 A	4,12 A	1,66
SOL	5,66 A	3,96 A	1,70
PER	5,36 B	3,76 B	1,60
SGU10	6,02	4,27	1,75
SGU01	5,53	3,96	1,57
SOL10	6,09	4,19	1,90
SOL01	5,24	3,73	1,51
PER10	5,50	3,84	1,66
PER01	5,22	3,68	1,55
M	5,60	3,95	1,66
ETR	0,29	0,22	0,14
ETM	0,15	0,11	0,07

M : moyenne ; ETR : écart-type résiduel ; ETM : écart-type des moyennes.

échantillons de 200 mg sont analysés après minéralisation Kjeldahl en présence de fer réduit et distillation en milieu alcalin sous courant de vapeur d'eau. La détermination des excès isotopiques se fait par spectrométrie d'émission optique (SOPRA GSI) après conversion en azote moléculaire par l'hypobromite de lithium (GUIRAUD et FARDEAU, 1980).

A titre de contrôle, environ la moitié des échantillons a été analysée par spectrométrie de masse (service de radioagronomie, CEN-Cadarache).

Bien que les plus faibles excès isotopiques mesurés (voisins de 0,1 %) soient proches de la limite de détection

permise par le spectromètre SOPRA, une bonne corrélation a été enregistrée entre les deux types de mesure ($r = 0,97$).

Les excès isotopiques du matériel végétal provenant des deux rangées de garde sont trop faibles pour être mesurés au spectromètre d'émission optique.

Les tests statistiques, exécutés à l'aide du logiciel STATITCF (ITCF, 1987) comprennent une analyse de variance et des comparaisons multiples de moyennes (test de Newman et Keuls, au seuil de 5 %). Le dispositif en carré latin a été retenu afin de s'affranchir d'éventuels gradients de fertilité. Pour les lignes, disposées perpendiculairement à

TABLEAU IV Contribution de l'azote engrais (Ndff %).

Traitements	Total	Grain	Paille
10	14,7 A	13,7 A	16,8 A
1	9,0 B	8,4 B	10,6 B
SGU	16,0 A	15,1 A	18,3 A
SOL	11,0 B	10,1 B	12,9 B
PER	8,5 C	7,9 C	10,0 C
SGU10	19,2 A	18,0 A	21,8 A
SGU01	12,9 C	12,2 C	14,7 C
SOL10	15,7 B	14,5 B	18,3 B
SOL01	6,3 E	5,8 E	7,5 E
PER10	9,2 D	8,6 D	10,4 D
PER01	7,9 D	7,2 DE	9,5 D
M	11,9	11,1	13,7
ETR	1,24	1,44	1,39
ETM	0,62	0,72	0,70

M : moyenne ; ETR : écart-type résiduel ; ETM : écart-type des moyennes.

TABLEAU V Coefficients réels d'utilisation (CRU %).

Traitements	Total	Grain	Paille
10	29,8 A	19,5 A	10,3 A
1	16,6 B	11,0 B	5,6 B
SGU	32,0 A	21,4 A	10,5 A
SOL	22,0 B	14,1 B	7,8 B
PER	15,7 C	10,2 C	5,5 C
SGU10	39,4 A	26,3 A	13,1 A
SGU01	24,5 C	16,6 C	7,9 C
SOL10	32,7 B	20,8 B	11,9 B
SOL01	11,2 E	7,4 E	3,8 E
PER10	17,3 D	11,3 D	5,9 D
PER01	14,0 E	9,0 DE	5,0 D
M	22,7	15,2	7,9
ETR	2,56	1,99	0,88
ETM	1,28	1,00	0,44

M : moyenne ; ETR : écart-type résiduel ; ETM : écart-type des moyennes.

l'axe du bas-fond, les variations sont plus importantes que pour les colonnes. Ce dispositif a permis d'améliorer sensiblement la précision (tableaux II à V).

Résultats et discussion

Quantités de matière sèche

Malgré la forte variabilité liée à la petite taille des parcelles, des différences significatives globales sont enregistrées (figure 4 et tableau II).

Les supergranules d'urée et la solution d'urée donnent des résultats similaires (SGU = 727 et SOL = 702 g · m⁻² de m.s.), nettement plus élevés que la perlurée (660 g · m⁻²). De même, le placement à 10 cm de profondeur s'accompagne de rendements bien supérieurs à l'application en surface (10 cm = 734 g · m⁻² contre 1 cm = 659 g · m⁻²). Avec une probabilité de 0,051, la tendance des interactions mérite d'être considérée. Le placement profond des supergranules d'urée comme de la solution d'urée, nettement plus efficace que leur apport superficiel, donne des résultats comparables (SGU10 = 766 g · m⁻² contre SGU01 = 689 et SOL10 = 758 contre SOL01 = 647 respectivement).

Pour la perlurée, si les effets d'un apport en surface ne sont pas très différents de ceux observés avec la SOL ou les SGU, le placement n'a, en revanche, que peu d'influence (PER01 = 642 contre PER10 = 679 g · m⁻²).

Il faut souligner que les écarts sont plus marqués pour les pailles que pour les grains. Dans le cas des pailles, les interactions significatives permettent de différencier très nettement les apports en profondeur de supergranules d'urée et de solution d'urée des autres traitements. Les différences s'atténuent et se modifient sensiblement pour les grains. Seuls les effets forme et profondeur ressortent et, de plus, l'influence de la solution diminue. Elle conduit à des résultats voisins de ceux de la perlurée.

Exportations d'azote

Azote total. L'influence générale des traitements est du même type sur les exportations d'azote que sur la production de matière sèche par les parties aériennes du riz (figure 5).

Les effets forme et profondeur sont retrouvés, et bien que les interactions ne soient pas significatives (probabilité de 0,078 %), les mêmes tendances sont observées (tableau III).

Remarquons toutefois que pour les grains, qui ont une teneur en azote plus élevée que les pailles, les écarts sont plus nets. En effet, dans le cas des pailles, seul l'effet profondeur est significatif. Mais, avec une probabilité de 0,060 % pour l'interaction, on peut noter que l'effet profondeur, toujours peu marqué pour la perlurée, est sensiblement plus fort pour la solution que pour les supergranules. Pour les grains, l'effet forme mais aussi l'effet profondeur sont significatifs, tandis que les interactions sont atténuées.

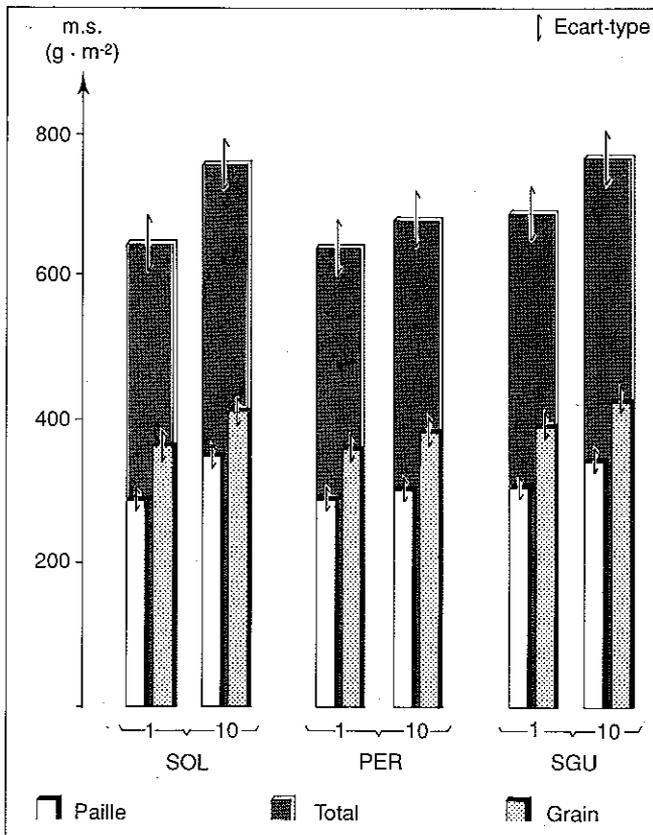


FIGURE 4 : Poids de matière sèche (g · m⁻²).

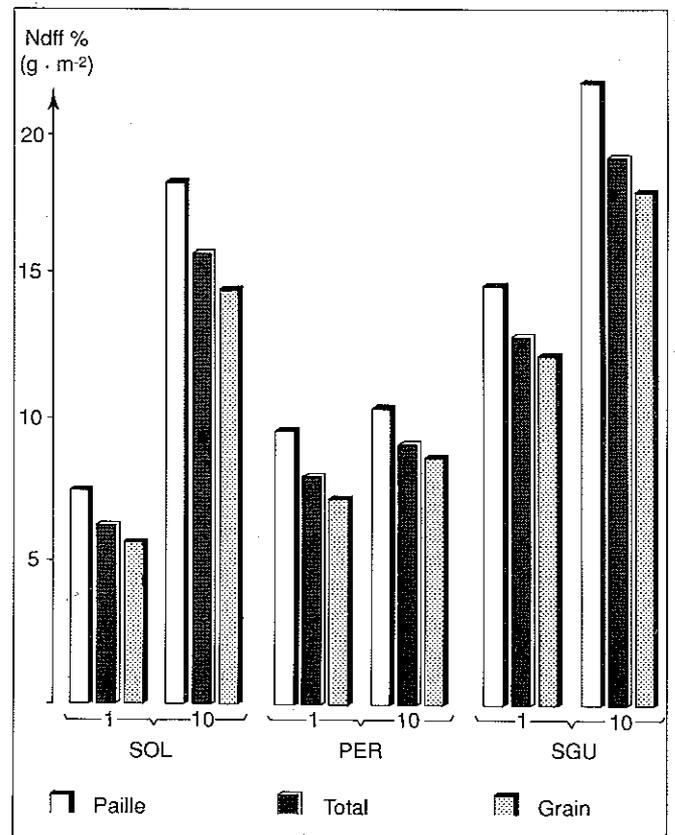


FIGURE 6 : Contribution de l'azote de l'engrais, en pourcentage de l'azote total exporté (Ndff %).

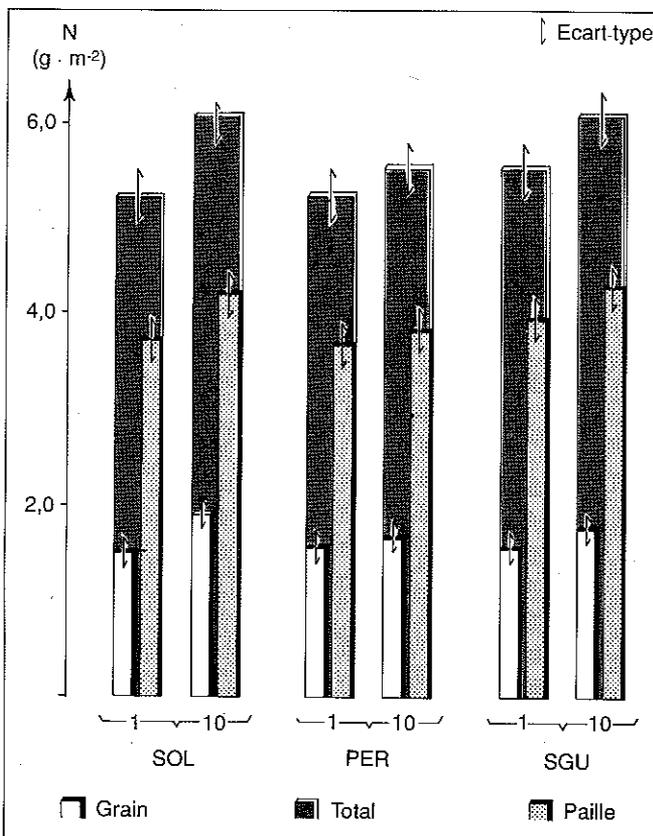


FIGURE 5 : Quantités totales d'azote (g · m⁻²).

Azote de l'engrais. La contribution de l'azote engrais (Ndff) dans l'azote total dépend autant de la forme que de la profondeur des apports (figure 6).

Tous les traitements diffèrent entre eux (tableau IV) sauf dans le cas de la perlurée, où la profondeur d'apport ne joue aucun rôle. Le traitement SGU01 occupe une position médiane entre le traitement le moins efficace, SOL01, et le plus efficace, SGU10. Pour sa part, SOL10 se place entre les deux traitements SGU. Quels que soient les traitements, les Ndff des pailles sont plus élevés que ceux des grains.

Les Ndff sont peu élevés, ce qui indique une participation limitée de l'azote engrais par rapport à l'azote du sol et justifie les faibles différences de rendement observées. Exprimée en termes de quantités d'azote provenant de l'engrais ou en termes de coefficients réels d'utilisation (tableau V), cette contribution de l'engrais varie de façon analogue (figure 7).

Le placement en profondeur de supergranules d'urée conduit à des coefficients réels d'utilisation de l'azote légèrement plus élevés que par l'injection d'une solution à 10 cm (SGU10 = 39,4 % - SOL10 = 32,7 %), tandis que l'enfouissement de perlurée à 10 cm donne de moins bons résultats qu'un apport de supergranules d'urée en surface (PER10 = 17,3 % - SGU01 = 24,5 %). La perlurée à 10 cm est toutefois sensiblement plus efficace qu'un apport en surface de perlurée ou de solution (PER01 = 14 % - SOL01 = 11,2 %).

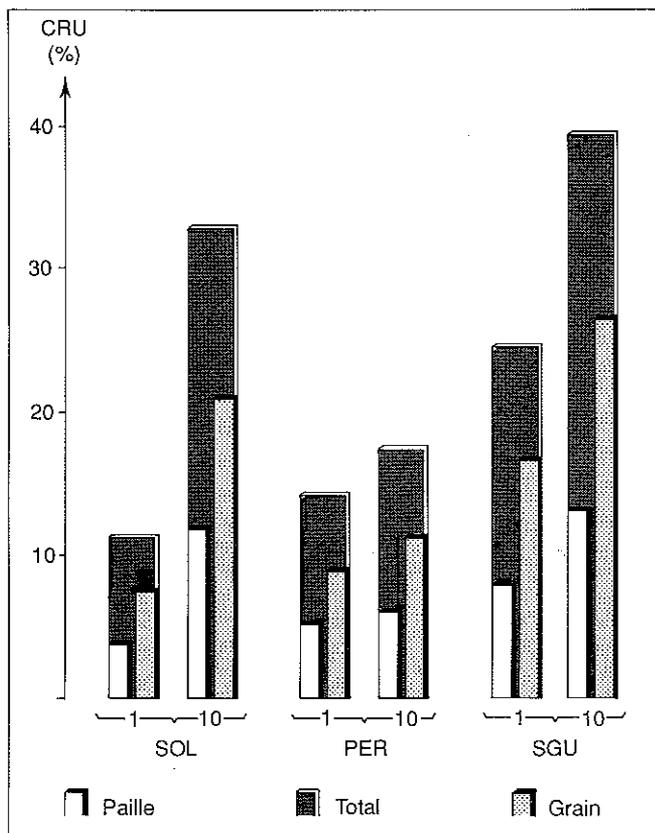


FIGURE 7 : Coefficients réels d'utilisation de l'azote (CRU %).

Notons enfin que, si la perlurée est un peu mieux utilisée que la solution au niveau des pailles (PER01 = 5 % - SOL01 = 3,8 %), cet effet s'atténue pour les grains (PER01 = 9 % - SOL01 = 7,4 %). Les coefficients réels d'utilisation (CRU) sont toujours plus faibles pour les pailles que pour les grains.

Dans les conditions les plus favorables, cas des supergranules d'urée où les pertes initiales sont limitées, si les bas niveaux des Ndff doivent être attribués à la faible dose d'engrais apportée, les CRU restent réduits ; ce qui nous conduit à envisager l'existence d'autres facteurs limitant l'assimilation minérale dans nos conditions expérimentales.

Les traitements n'induisent pas de variations notables dans l'utilisation de l'azote du sol, sauf au niveau des pailles, où les exportations d'azote augmentent avec le placement en profondeur de l'engrais (1,47 contre 1,38 g · m⁻²). Ce phénomène, vraisemblablement lié au meilleur développement du végétal, ne se retrouve ni pour les autres traitements ni pour les grains.

Conclusion

Pour une même dose d'azote, le placement en profondeur de l'engrais se traduit par des augmentations très significatives des rendements et surtout des coefficients réels d'utilisation de l'engrais. L'ordre de grandeur des résultats

obtenus pour une faible dose d'azote (27 kg N · ha⁻¹) est comparable à celui observé aux doses de 54 et 81 kg N · ha⁻¹ dans les conditions toutefois différentes des essais antérieurs.

En dissociant, dans le terme placement de l'engrais, les notions de profondeur et de forme, une prépondérance de l'effet profondeur se dégage sur l'ensemble des paramètres analysés. Quel que soit le mode de structuration de l'engrais, un placement à 10 cm est plus efficace qu'un apport en surface. L'apport d'engrais azotés en surface s'accompagne de pertes importantes qui peuvent avoir deux origines.

La première, et la plus immédiate, consiste en une mise en solution dans la lame d'eau au moment de l'apport. Dans des rizières en cascade, le renouvellement de l'eau est rapide et les pertes sont considérables. C'est ce qui se produit pour SOL01 et PER01, bien que dans ce dernier cas le phénomène puisse être légèrement ralenti, d'où des résultats sensiblement meilleurs pour les pailles (sinon pour les grains), mais l'effet reste très limité. Dans le cas de SGU01, qui occupe une position intermédiaire entre des apports en surface (SOL01, PER01) et des apports en profondeur (SOL10, SGU10), les conséquences de l'entraînement dans la lame d'eau sont atténuées au moment de l'apport par la dissolution et la diffusion plus progressive de l'urée.

A cette première catégorie de phénomènes responsables de pertes quasi immédiates s'ajoute une seconde série de processus plus lents se déroulant dans la zone superficielle du sol. Ce sont essentiellement les mécanismes de volatilisation (MACRAE et ANCAJAS, 1970 ; FILLERY et DE DATTA, 1986 ; MIKKELSEN *et al.*, 1978 ; BOUWMEESTER *et al.*, 1985 ; FILLERY et VLEK, 1986 ; VLEK et CRASWELL, 1981), et de nitrification suivie, après migration, de dénitrification (FILLERY et VLEK, 1982 ; PATRICK, 1982 ; REDDY *et al.*, 1980 ; WATANABE *et al.*, 1981 ; SAHRAWAT, 1982 ; SMITH et DELAUNE, 1984), qui seront responsables des pertes complémentaires. L'intensité de la volatilisation dépend du pH (équilibre NH₄⁺-NH₃), de la diffusion de NH₃ dans le sol et l'eau de submersion, enfin de la pression partielle en NH₃ à l'interface sol-eau, tandis que la nitrification ne peut être importante que dans la zone oxydée du sol et n'entraîne des pertes conséquentes par lixiviation ou dénitrification qu'après migration des nitrates en profondeur. Cette dernière étape implique des sols filtrants et l'absence de nappe en charge, ce qui n'est généralement pas le cas dans les bas-fonds. Il faut noter enfin que le placement profond ne permet pas d'éliminer les phénomènes d'immobilisation mais peut en modifier les caractéristiques (KAI et WADA, 1979).

L'effet forme, très marqué en matière d'azote engrais (Ndff, CRU) conduit à classer les traitements dans l'ordre suivant : SGU > SOL > PER.

L'absence de différence entre PER10 et PER01 peut être attribuée à une très forte délocalisation de l'engrais au moment du placement, avec mise en solution et remontée au moment de la fermeture du sillon. Une injection méticuleuse en profondeur (SOL10) ne s'accompagne pas d'une telle délocalisation. L'efficacité du placement en profondeur est incontestable, seul le manque de rigueur dans son exécution peut en limiter les effets.

Pour les deux formes d'engrais correctement localisées (SGU10 et SOL10), des gradients de concentrations en $N-NH_4^+$ doivent se développer après hydrolyse de l'urée. Les caractéristiques de ces gradients comme les adaptations induites du système racinaire du riz seront à l'origine des écarts observés, à savoir, une meilleure efficacité des supergranules d'urée et une persistance plus durable des effets (SAVANT *et al.*, 1982 ; GAUDIN, 1987 ; GAUDIN *et al.*, 1987 ; GAUDIN, 1988).

Sans qu'aucun mécanisme de libération progressive de l'azote ou d'inhibition de la nitrification intervienne, tout type de conditionnement permettant de déposer et de maintenir en profondeur une source ponctuelle d'engrais doit accroître très sensiblement les coefficients réels d'utilisation. Pour l'ensemble de nos essais, ils demeurent cependant assez faibles, ce qui indique l'influence d'autres facteurs limitants que les facteurs forme et profondeur.

Ces facteurs limitants sont à rechercher soit dans la disponibilité de l'azote engrais au cours de la croissance soit dans la présence de substances inhibitrices pouvant affecter la nutrition minérale du riz inondé. Dans le premier cas, il conviendrait d'étudier l'effet du fractionnement des apports et de la cinétique de prélèvement de l'azote de l'engrais. La seconde éventualité, plus délicate à aborder, doit dépendre essentiellement des conditions d'oxydoréduction du milieu et des niveaux de substances réductrices, qu'il conviendrait de caractériser. Ce n'est que dans une étape ultérieure que les résultats pourront être affinés en prenant en compte différentes situations types.

Reçu le 10 janvier 1989.

Accepté le 17 janvier 1990.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier le Programme engrais malgache et l'AEIA pour leur contribution à la réalisation de ce travail, ainsi que M. Guiraud et Mme Marol (DB/SRA, CEN-Cadarache, France) et le personnel technique de l'URER d'Antsirabe et du LRI.

Références bibliographiques

- BOUWMEESTER R.J.B., VLEK P.L.G., STUMPE J.M., 1985. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from urea-fertilized soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49 (2) : 376-381.
- CAO Z.H., DE DATTA S.K., FILLERY I.R.P., 1984. Effect of placement methods on floodwater properties and recovery of applied nitrogen (^{15}N -labeled urea) in wetland rice. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 (1) : 196-203.
- CRASWELL E.T., DE DATTA S.K., OBCEMEA W.N., HARTANTYO M., 1981. Time and mode of nitrogen fertilizer application to tropical wetland rice. *Fert. Res.*, 2 (4) : 247-259.
- DE DATTA S.K., 1981. *Principles and practices of rice production*. Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 618 p.
- D'ONOFRIO G., DUPUY J., GAUDIN R., RAVOHITRARIVO P., 1985. Effets comparés de l'application de perlurée et de supergranules d'urée sur riz inondé à Madagascar. Antananarivo, ministère de la Production agricole et de la Réforme agraire, Programme engrais malgache - FAO, 26 p.
- FILLERY I.R.P., VLEK P.L.G., 1982. The significance of denitrification of applied nitrogen in fallow and cropped rice soils under different flooding regimes. *Plant Soil*, 65 (2) : 153-169.
- FILLERY I.R.P., DE DATTA S.K., 1986. Ammonia volatilization from nitrogen sources applied to rice fields. I. Methodology, ammonia fluxes and nitrogen-15 loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 (1) : 80-86.
- FILLERY I.R.P., VLEK P.L.G., 1986. Reappraisal of the significance of ammonia volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields. *Fert. Res.*, 9 (1-2) : 79-88.
- GAUDIN R., 1987. L'effet supergranule d'urée (SGU) en sols de rizière : un problème de diffusion avec échange d'ions. Essai de modélisation. Thèse de doctorat, sciences agronomiques, INPL, Nancy, 147 p.
- GAUDIN R., DUPUY J., BOURNAT P., 1987. Suivi du contenu en azote de la solution du sol d'une rizière après placement d'urée. *L'Agron. Trop.*, 42 (1) : 13-19.
- GAUDIN R., 1988. L'ammoniac NH_3 , une clé pour comprendre l'efficacité des supergranules d'urée en riziculture irriguée. *L'Agron. Trop.*, 43 (1) : 30-36.
- GUIRAUD G., FARDEAU J.-C., 1980. Détermination isotopique par spectrométrie optique de composés faiblement enrichis en azote 15. *Analysis*, 8 (4) : 148-152.
- HALL V.L., RAILEY R.M., 1964. Timing nitrogen fertilization of rice with the morphological development of the rice plant. *Rice J.*, 67 : 6-8.
- KAI H., WADA K., 1979. Chemical and biological immobilization of nitrogen in paddy soils. In : *Nitrogen and Rice*. Los Baños, Philippines, IRRI, p. 157-174.
- MACRAE I.C., ANCAJAS J.K., 1970. Volatilization of ammonia from submerged tropical soils. *Plant Soil*, 33 : 97-103.
- MALHI S.S., NYBORG M., 1988. Control of nitrification of fertilizer nitrogen. Effect of inhibitors, banding and nesting. *Plant Soil*, 107 (2) : 245-250.
- MIKKELSEN D.S., DE DATTA S.K., OBCEMEA W.N., 1978. Ammonia volatilization losses from flooded rice soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42 (5) : 725-730.
- PATRICK W.H.J., 1982. Nitrogen transformations in submerged soils. In : *Nitrogen in Agricultural Soils*, Madison, Stevenson (F.J.) Ed., p. 449-465.
- PRASAD R., DE DATTA S.K., 1979. Increasing fertilizer nitrogen efficiency in wetland rice. In : *Nitrogen and Rice*. Los Baños, Philippines, IRRI, p. 465-485.
- REDDY K.R., PATRICK W.H., PHILLIPS R.E., 1980. Evaluation of selected processes controlling nitrogen loss in a flooded soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44 (6) : 1241-1246.
- ROY B., 1985. Nitrogen use efficiency in transplanted rice with point placement method. *Oryza*, 22 : 53-56.
- SAVANT N.K., CRASWELL E.T., DIAMOND R.B., 1983. Use of urea supergranules for wetland rice : a review. *Fert. News*, 28 (8) : 27-35.
- SAVANT N.K., DE DATTA S.K., CRASWELL E.T., 1982. Distribution patterns of ammonium nitrogen and ^{15}N uptake by rice after deep placement of urea supergranules in wetland soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46 (3) : 567-573.
- SAHRAWAT K.L., 1982. Nitrification in some tropical rice soils. *Plant Soil*, 65 (2) : 281-286.
- SHARMA S.N., PRASAD R., 1980. Effect of rates of nitrogen and relative efficiency of sulfur coated urea and nitrapyrin-treated urea in dry matter production and nitrogen uptake by rice. *Plant Soil*, 55 (3) : 389-396.

SHOJI S., ANDO H., WADA G., 1986. Fate of nitrogen in paddy fields and nitrogen absorption by rice plants. *Jap. Agric. Res. Q.*, 20 (2) : 127-134.

SMITH C.J., DELAUNE R.D., 1984. Effect of rice plants nitrification-denitrification loss of nitrogen under greenhouse conditions. *Plant Soil*, 79 (2) : 287-290.

SUDHAKARA K., PRASAD R., 1986. Ammonia volatilization losses from prilled urea, urea supergranules (USG) and coated USG in rice fields. *Plant Soil*, 94 (2) : 293-295.

VLEK P.L.G., CRASWELL E.T., 1981. Ammonia volatilization from flooded soils. *Fert. Res.*, 2 (4) : 227-245.

WATANABE I., PADRE B.C., SANTIAGO S.T., 1981. Quantitative study on nitrification in flooded rice soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 27 (3) : 373-382.

YOSHIDA S., 1981. Fundamentals of rice crop science. Los Baños, Philippines, IRRI.

Summary

DUPUY J., D'ONOFRIO G., GAUDIN R. – **Study with ^{15}N -urea on the nitrogenous fertilization of flooded rice in Madagascar. I. Comparison between urea supergranules, urea prills, and urea solution placed at 1 cm or 10 cm in the soil.**

In order to evaluate in the notion of placement the role of the fertilizer form and placement depth, the authors have carried out a study on flooded rice fertilization with ^{15}N -urea applied in the form of supergranules, prills and solution placed at 1 cm and 10 cm in the soil. Urea supergranules and urea solution produced markedly higher total amounts of dry matter in the above ground part of the plant than did urea prills whereas deep placement was more efficient than surface application. Increased removals are connected with the actual coefficients of nitrogen recovery more important for deep placement than for surface applications whereas divergences are much smaller for urea prills. A better performance of correct deep placements is discussed in terms of the relative importance of superficial losses according to fertilizer form, and in relation to the notion of NH_4^+ concentration gradient for placements 10 cm deep.

Key words : *Oryza sativa*, rice, ^{15}N , urea, form, depth.

Resumen

DUPUY J., D'ONOFRIO G., GAUDIN R. – **Estudio por medio de urea enriquecida con ^{15}N de la fertilización nitrogenada del arroz anegado en Madagascar. I. Comparación entre supergránulos de urea, perlurea y disolución de urea aplicados a 1 cm o 10 cm de profundidad.**

A fin de evaluar la importancia de la estructuración y de la profundidad en la noción de ubicación del abono, se ha llevado a cabo un experimento de fertilización del arroz anegado aplicando, a 1 cm y 10 cm de profundidad, urea enriquecida con nitrógeno ^{15}N en forma de supergránulos, perlurea y solución de urea. En términos de cantidad total de materia seca de las partes aéreas, los supergránulos y la solución permiten una producción mucho mayor que la perlurea, y la aplicación profunda resulta más eficaz que la superficial. Este aumento de las exportaciones está relacionado con los coeficientes reales de utilización del nitrógeno, que son mayores con aplicaciones de supergránulos y solución profundas que con aplicaciones superficiales, mientras que con la perlurea, las diferencias son menores. Se discute, en términos de importancia relativa de las pérdidas superficiales, la obtención de mejores resultados con aplicaciones correctas en profundidad, según la estructuración del abono, por un lado, y en relación con la noción de gradiente de concentración de NH_4^+ en el caso de fertilizaciones aplicadas a 10 cm de profundidad por otro lado.

Palabras-clave : *Oryza sativa*, arroz, nitrógeno ^{15}N , urea, forma, profundidad.

Etude à l'aide d'urée enrichie en ^{15}N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar

II – Effets d'un apport unique ou de deux apports de supergranules d'urée ou de perlurée au cours de la phase initiale de croissance du riz inondé

J. DUPUY (1), R. GAUDIN (1), G. D'ONOFRIO (2)

RÉSUMÉ – Pour le riz inondé, l'effet de la date d'enfouissement de l'engrais azoté, en une ou deux fois, a été évalué pour une dose d'urée de $58 \text{ kg de N} \cdot \text{ha}^{-1}$ présentée sous forme de supergranules ou de perlurée enrichis en azote ^{15}N . Par rapport au témoin sans azote, les accroissements de rendement sont toujours plus importants pour les supergranules d'urée que pour la perlurée. Pour des apports uniques, l'augmentation de la production de matière sèche est plus réduite pour des enfouissements au repiquage que pour des apports différés (21 et 42 jours après repiquage), un apport à 21 jours étant un peu plus efficace qu'un apport à 42 jours. Cet effet est plus marqué pour la perlurée que pour les supergranules d'urée. Ces augmentations sont liées à de très nettes améliorations des taux d'intervention de l'azote provenant de l'engrais comme des coefficients réels d'utilisation, bien que ceux-ci restent très voisins pour des apports différés. Associer à un apport au repiquage un apport à 21 ou 42 jours améliore l'utilisation globale de l'engrais et plus particulièrement de la perlurée. Les effets sont plus limités pour un premier apport tardif. L'influence du premier apport sur le second est réduite. Ces résultats sont discutés en termes de stress succédant au repiquage ainsi qu'en termes de niveaux et de durée de disponibilité de l'azote de l'engrais.

Mots clés : *Oryza sativa*, riz, supergranules, perlurée, azote ^{15}N , date d'apport, modalités d'apport.

Les travaux précédents nous ont permis de montrer que l'efficacité maximale de l'urée sous forme de supergranules par rapport à la perlurée est liée plus au placement profond qu'au conditionnement de l'engrais (D'ONOFRIO *et al.*, 1985 ; DUPUY *et al.*, 1990).

Toutefois, comme les coefficients réels d'utilisation de l'azote restent faibles, même dans les situations les plus favorables, nous avons été amenés à envisager l'existence de fac-

teurs limitants pouvant se situer au niveau soit de la disponibilité de l'engrais soit de l'influence de substances inhibitrices affectant la nutrition minérale du riz inondé.

Afin d'évaluer, pendant la phase initiale de croissance, l'influence de la date d'apport d'engrais sur son utilisation, une nouvelle expérience, conduite en présence d'azote ^{15}N , a été mise en place. Elle comporte trois dates rapprochées d'apport, en une ou deux fois, sous forme de perlurée ou de supergranules.

Matériel et méthode

Dispositif expérimental

L'essai est conduit sur un sol hydromorphe à pseudogley situé à Arivonimamo (à l'ouest de Tananarive). Il est constitué de cinq blocs randomisés comportant les traitements suivants :

– forme d'engrais : supergranules d'urée (SGU), perlurée (PER) ;

– dose d'engrais : 8 g ou 2×4 g d'urée par mètre carré, soit au total $58 \text{ kg de N} \cdot \text{ha}^{-1}$;

– modalités d'apport (* = apport d'engrais enrichi en ^{15}N) :

- un apport unique d'urée enrichie en azote ^{15}N
au repiquage = 0 JAR = 1*0
21 jours après repiquage = 21 JAR = 2*0
42 jours après repiquage = 42 JAR = 3*0

- deux apports, par demi-dose, un apport marqué, l'autre non
0 JAR et 21 JAR = 1*2 et 12*
21 JAR et 42 JAR = 2*3 et 23*
0 JAR et 42 JAR = 1*3 et 13*

L'excès isotopique de l'urée est de 2,83 %

- témoin sans azote

A la mise en boue, tous les traitements reçoivent une fumure de fond de $60 \text{ kg de P}_2\text{O}_5$ et de K_2O à l'hectare. Le riz,

(1) LRI, service de radioagronomie, BP 3383, Antananarivo 101, Madagascar.

(2) PEM/FAO, direction de la Vulgarisation, MPARA, Antananarivo 101, Madagascar.

variété 1285, est planté à trois brins, avec un écartement de 20 x 20 cm. Des canaux d'irrigation et de drainage desservent les blocs, qui sont séparés par diguettes.

L'expérience ayant montré que les perturbations du milieu provoquées par la construction des diguettes, même avec des matériaux prélevés hors rizière, sont très grandes pour des surfaces réduites et qu'il est difficile, voire illusoire, d'assurer une gestion rigoureuse de l'eau par parcelle, nous avons choisi de ne pas délimiter les parcelles à l'intérieur des blocs (DUPUY *et al.*, 1990) mais d'augmenter le nombre de rangées de garde tout en conservant la géométrie des placettes marquées (0,64 m²).

Bien que les pertes par ruissellement soient la règle pour des apports d'engrais mal localisés, on estime que ces phénomènes, qui se retrouvent en milieu naturel, de par leur rapidité et malgré leur intensité n'entraînent pas de contamination importante et durable d'une parcelle à l'autre, tandis que la diffusion dans le sol d'un engrais correctement placé est réduite (GAUDIN, 1987).

Analyses

Les analyses chimiques et isotopiques sont conduites selon les protocoles décrits dans l'article précédent (DUPUY *et al.*, 1990).

Les analyses statistiques, réalisées à l'aide du logiciel STATICEF, comprennent une analyse de variance, des comparaisons multiples de moyennes par la méthode de Newman et Keuls, au seuil de 5 % (tableaux I à IV) et la méthode des contrastes (tableaux V à VIII).

Résultats et discussion

Production de matière sèche

Pour tous les traitements ayant reçu de l'azote (figure 1), les quantités de matière sèche (m.s.) des parties aériennes sont supérieures à celles du témoin sans azote : 530 g · m⁻² de m.s., dont 356 g · m⁻² de grain pour le témoin, contre 781 g · m⁻² de m.s., dont 504 g · m⁻² de grain pour l'ensemble des traitements (tableau I).

Quelles que soient les modalités d'application, les supergranules d'urée conduisent à une production de matière sèche plus élevée que la perlurée (841 g · m⁻² de m.s., dont 542 g · m⁻² de grain pour les supergranules d'urée contre 721 g · m⁻² de m.s., dont 466 g · m⁻² de grain pour la perlurée). Un apport unique de supergranules d'urée au repiquage (SGU10 = 775 g · m⁻² de m.s.) est moins efficace qu'un apport à 21 JAR (SGU20 = 924 g · m⁻² de m.s.). Cette différence est plus sensible pour les grains (590 g · m⁻² > 489 g · m⁻²) que pour les pailles (334 g · m⁻² ≈ 286 g · m⁻²). En revanche, l'azote placé à 42 JAR (SGU30 = 804 g · m⁻²) donne des résultats proches d'un apport à 0 JAR. Bien que plus fortes pour les grains (534 g · m⁻² contre 489 g · m⁻²), les différences ne sont pas significatives.

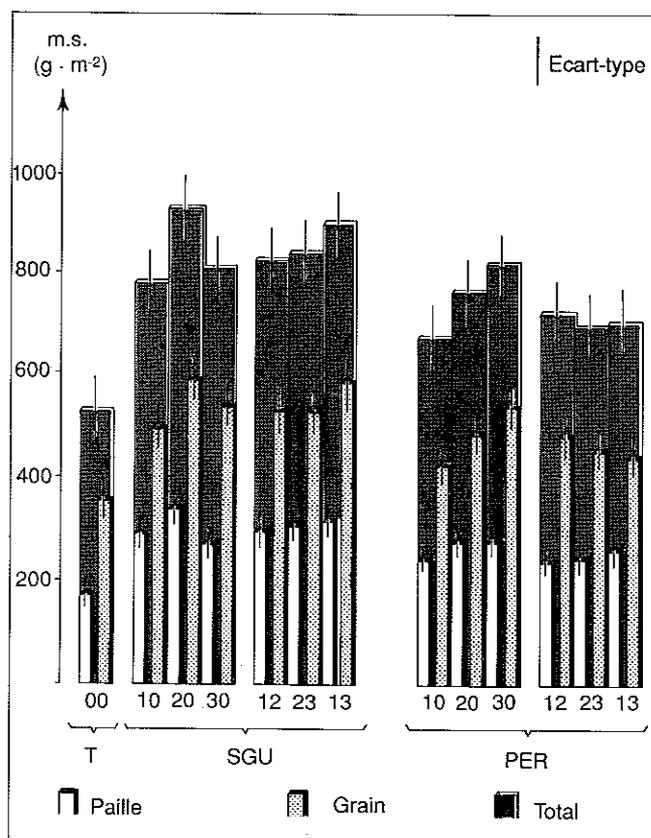


FIGURE 1 : Poids de matière sèche (g · m⁻²).

TABLEAU I Poids de matière sèche (g · m⁻²).

Traitements	Total	Grain	Paille
SGU10	775 BCDEF	489 BC	286 ABC
SGU20	924 A	590 A	334 A
SGU30	804 ABCDE	534 AB	270 BC
SGU12	820 ABCD	527 AB	293 ABC
SGU23	831 ABC	528 AB	303 AB
SGU13	893 AB	581 A	312 AB
PER10	664 F	422 C	242 C
PER20	754 CDEF	477 BC	277 ABC
PER30	811 ABCDE	534 AB	277 ABC
PER12	712 CDEF	477 BC	234 C
PER23	689 EF	449 BC	240 C
PER13	695 DEF	439 C	256 BC
TEM	530 G	356 D	174 D
M	762	493	269
ETR	64,95	44,11	29,41
ETM	29,05	19,73	13,15

Ces données peuvent s'interpréter, pour un apport à 0 JAR, comme une sous-utilisation initiale couplée à des pertes entraînant une insuffisance en azote en fin de cycle, et pour un apport à 42 JAR, comme un manque d'azote en début de cycle préjudiciable au bon redémarrage de la végétation.

Pour la perlurée, les comportements ne sont pas tout à fait semblables, puisqu'un apport unique à 42 JAR est sensiblement meilleur qu'un apport à 0 JAR ($PER_{30} = 811 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} > PER_{10} = 664 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). L'effet, qui est très net pour les grains ($534 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} > 422 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), ne l'est pas pour les pailles ($277 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \approx 242 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$).

L'apport à 21 JAR occupe une position intermédiaire ($PER_{20} = 754 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ de m.s., dont $477 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ de grain).

L'apport à 42 JAR de supergranules d'urée ou de perlurée donne des résultats voisins ($SGU_{30} = 804 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ de m.s., $534 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ de grain et $PER_{30} = 811 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ de m.s., $534 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ de grain), tandis que les phénomènes limitants initiaux semblent avoir plus d'influence pour la perlurée que pour les supergranules d'urée placés à 0 JAR ($PER_{10} = 664 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} < SGU_{10} = 775 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$).

Notons enfin que, à 21 JAR, les supergranules d'urée entraînent une plus forte production de matière sèche que la perlurée ($SGU_{20} = 924 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} > PER_{20} = 754 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), et ce, plus encore pour les grains ($590 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} > 477 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) que pour les pailles ($334 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} > 277 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$).

Ces éléments indiquent que d'autres facteurs que celui de la date d'apport, tels que la durée de disponibilité de l'engrais, doivent intervenir.

Fractionner les apports ne remet pas en cause la supériorité des supergranules d'urée par rapport à la perlurée ($848 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} > 699 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ de m.s.), mais réduit les écarts observés pour des apports uniques de l'une ou l'autre forme. Notons, en particulier, que si les résultats d'un apport unique de supergranules d'urée à 21 JAR dépassent ceux obtenus à 0 JAR et 42 JAR, il n'en va pas de même pour un apport fractionné à 21 et 42 JAR. Ce dernier indice permet d'envisager des problèmes de niveau de disponibilité associés à ceux de durée évoqués antérieurement.

Exportation d'azote

Azote total

Comme dans le cas de la matière sèche produite, les exportations d'azote sont plus grandes pour les parcelles fertilisées en azote que pour le témoin d'une part, et pour les traitements par supergranules d'urée que pour ceux avec perlurée d'autre part (figure 2).

Pour les divers types d'apport, les exportations d'azote suivent généralement des évolutions comparables à celles de la matière sèche (tableau II).

Une seule différence mérite d'être soulignée. Elle concerne l'apport de supergranules d'urée à 42 JAR. Contrairement à la production de matière sèche, les exportations d'azote sont du

même ordre de grandeur pour des apports à 21 et 42 JAR ($7,76$ et $7,60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) ; elles sont toutes deux supérieures à celles enregistrées pour un apport au repiquage ($6,46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). Ce résultat peut être lié à une mauvaise croissance initiale qu'un apport trop tardif ne permettrait pas de compenser malgré une meilleure assimilation de l'azote.

Azote de l'engrais

Les informations concernant l'azote provenant de l'engrais sont obtenues à partir des déterminations isotopiques. Les excès isotopiques mesurés sont souvent très faibles, à la limite de détection du spectromètre d'émission optique. Il en résulte une très forte dispersion, d'origine instrumentale, venant s'ajouter à la variabilité expérimentale déjà élevée due à la petite taille des parcelles. Les valeurs présentées doivent être interprétées avec prudence et ont essentiellement un caractère indicatif.

La contribution totale de l'azote engrais (Ndff) dans l'azote exporté par les parties aériennes du végétal (figures 3 a et 3 b) est toujours plus élevée pour les supergranules d'urée que pour la perlurée ($SGU = 35,4 \% > PER = 17,9 \%$).

Dans le cas d'un apport unique de supergranules d'urée (tableaux III a et III b), la participation de l'azote engrais est plus faible quand la fertilisation est appliquée au repiquage ($SGU_{10} = 27,2 \%$) que lorsqu'elle est différée ($SGU_{20} = 36,5 \%$, $SGU_{30} = 37,5 \%$). Les écarts négligeables dans ces

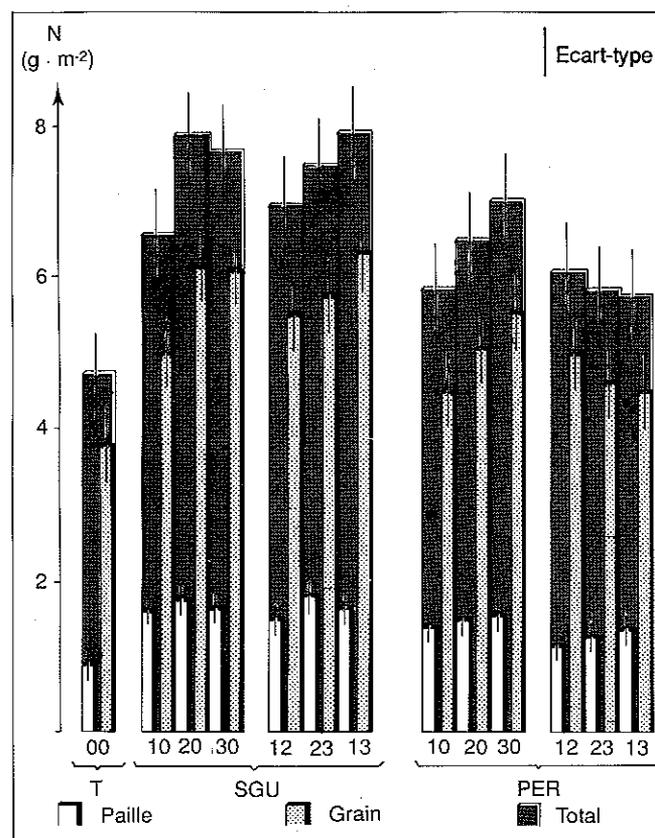


FIGURE 2 : Quantités totales d'azote ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$).

deux derniers cas confirment les hypothèses avancées dans l'analyse de la production de matière sèche.

Fractionner les apports de supergranules d'urée a un effet remarquable uniquement pour la première date d'apport. En effet, y associer un apport à 21 ou 42 JAR entraîne une très nette augmentation de la contribution de l'azote engrais (SGU12 = 36,6 %, SGU13 = 35,8 % contre SGU10 = 27,2 %), qui rejoint les valeurs observées pour des apports uniques différés.

(figures 4 et 5), les tableaux IV a et IV b montrent que l'apport d'une demi-dose au repiquage est mieux utilisé que l'apport d'une dose (1^{er} apport de SGU12 = 41,2 % et de SGU13 = 41,5 % contre 30,2 % pour SGU10), tandis qu'une demi-dose est légèrement moins bien utilisée qu'une dose pour un apport à 21 JAR (1^{er} apport SGU23 = 44,0 % contre 48,4 % pour SGU20).

Mais un second apport d'une demi-dose à 42 JAR est mieux utilisé que l'apport unique d'une dose (2^e apport

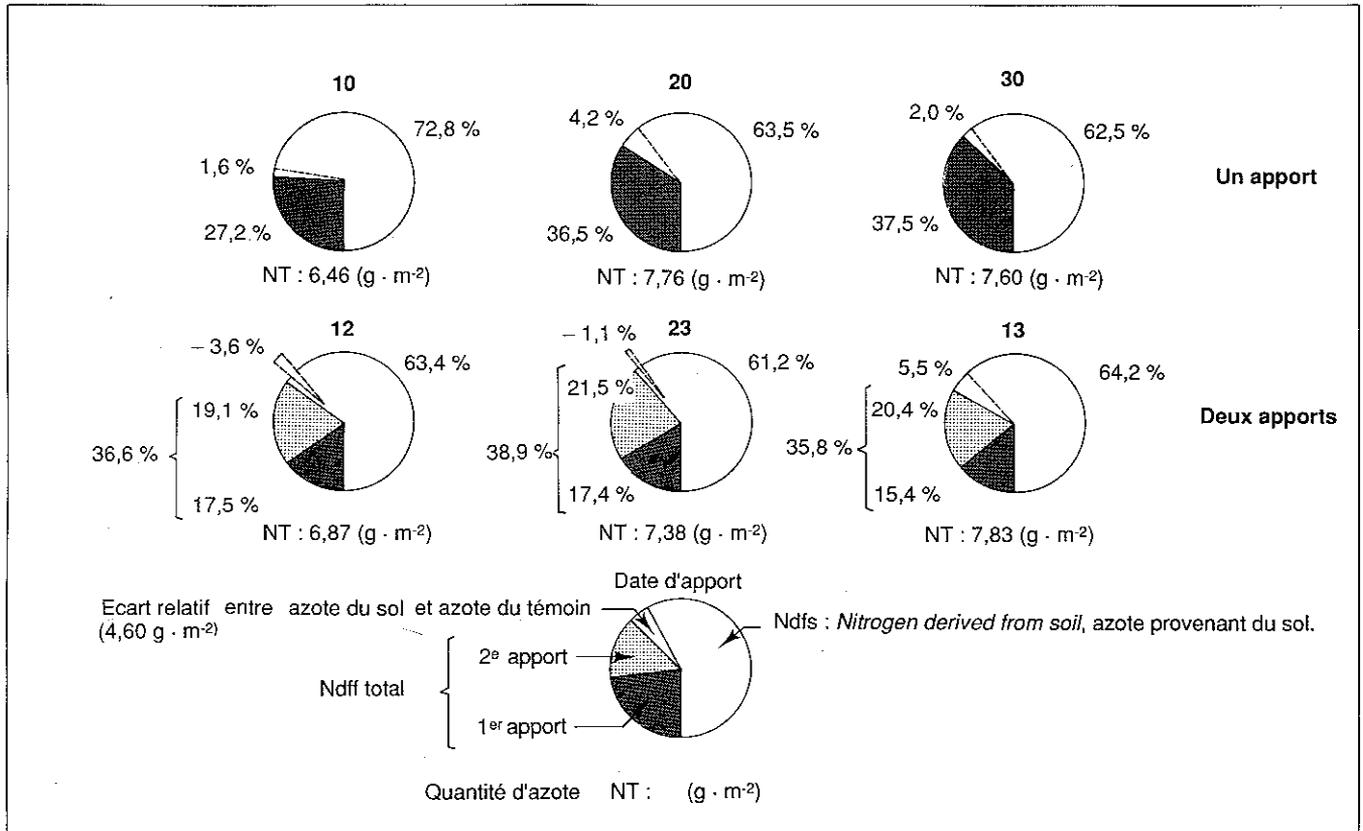


FIGURE 3 a : Bilan de l'azote du végétal avec les supergranules d'urée (SGU).

En revanche, fractionner un apport tardif ne donne pas de résultat, ce qui n'est guère surprenant étant donné les similitudes déjà enregistrées pour les Ndff des doses uniques (SGU23 = 38,9 % contre SGU20 = 36,5 % et SGU30 = 7,5 %).

Un premier apport d'engrais n'a qu'un très léger effet sur le second et, si les Ndff du second apport sont toujours supérieurs à ceux du premier, les écarts restent minimes.

Notons enfin que la contribution de l'engrais est toujours un peu plus élevée pour les pailles que pour les grains mais, ici encore, les différences sont réduites.

En termes de coefficients réels d'utilisation de l'azote

SGU23 = 54,5 % et SGU13 = 55,0 % contre 48,8 % pour SGU30).

Des résultats du même type sont observés pour la perlurée. Retarder une application unique de perlurée est encore plus efficace que dans le cas des supergranules d'urée. Cela tient plus au niveau très bas des Ndff engendrés par un apport au repiquage (PER10 = 8,0 %) qu'à l'effet propre du délai d'application puisque les Ndff de la perlurée apportée à 21 JAR ou 42 JAR (PER20 = 21,0 ; PER30 = 24,3 %) restent très nettement inférieurs à ceux des supergranules d'urée enfouis aux mêmes dates.

Associer un second apport au premier apport au repiquage favorise très nettement la participation de l'azote engrais.

Les Ndff atteints (PER12 = 17,4 %, PER13 = 18,0 %) restent toutefois plus faibles que ceux obtenus pour des apports uniques différés (PER20 = 21,0 %, PER30 = 24,3 %). Cet effet peut être dû aux pertes lors du placement de l'engrais, qui auraient un caractère cumulatif, non proportionnel à la quantité d'azote apportée.

Comme dans le cas des supergranules d'urée, l'effet d'un premier apport est négligeable pour un second apport tardif (2^e apport PER13 = 10,5 %, PER23 = 11,0 %). Il serait par contre sensible pour un apport au repiquage suivi d'un apport à 21 JAR (2^e apport PER12 = 11,4 %, 1^{er} apport PER23

que celle provenant d'une dose complète (1^{er} apport PER23 = 15,3 % contre PER20 = 23,2 %).

L'application d'une première demi-dose au repiquage permettra au contraire une meilleure utilisation de la demi-dose apportée à 21 JAR, qui serait alors comparable à celle de la dose entière (2^e apport PER12 = 23,4 % contre PER20 = 23,2 %).

Enfin, un apport d'une demi-dose à 42 JAR, précédé par un apport à 0 JAR ou 21 JAR, serait moins bien utilisé qu'un apport unique à 42 JAR (2^e apport PER13 = 20,9 % et PER23

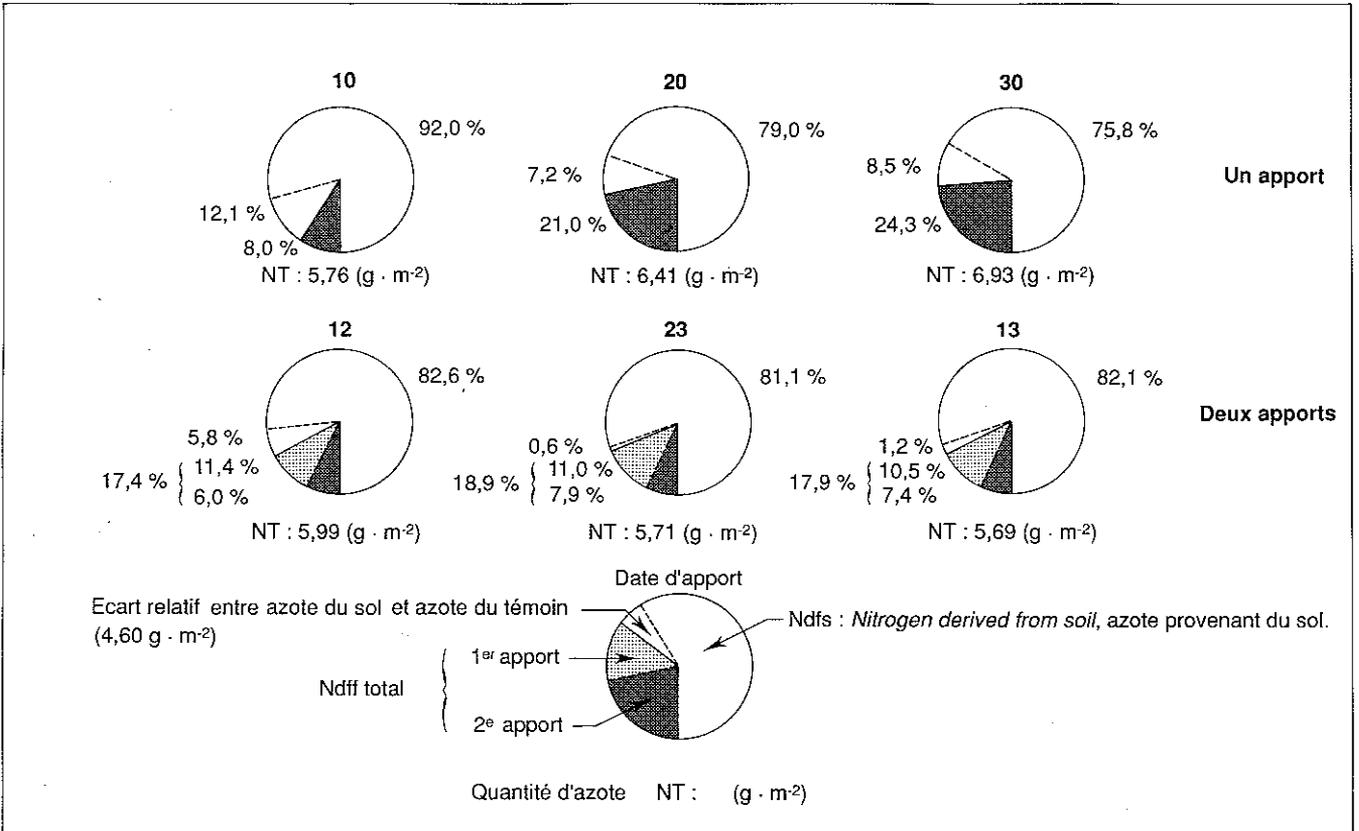


FIGURE 3 b : Bilan de l'azote du végétal avec la perlurée (PER).

= 7,9 %), le premier apport améliorant légèrement l'efficacité du second.

Pour l'ensemble des traitements, et plus nettement que dans le cas des supergranules, les Ndff des grains sont plus bas que ceux des pailles, reflétant une évolution de l'équilibre entre azote de l'engrais et azote du sol qui peut être attribuée à un déficit en azote engrais en fin de cycle et/ou à un accroissement des quantités d'azote assimilable du sol.

En termes de coefficient réel d'utilisation, une dose complète au repiquage est moins bien utilisée qu'une demi-dose (PER10 = 7,8 % contre 1^{er} apport PER12 = 12,3 %).

A 21 JAR, l'apport d'une demi-dose semble insuffisant, la quantité d'azote disponible devant être moins bien utilisée

= 21,4 % contre 28,9 % pour PER 30), contrairement à ce qui est observé pour les supergranules d'urée. Ce phénomène peut être mis au compte d'un effet cumulatif des pertes. La notion de « pertes » recouvre des phénomènes de plusieurs ordres. Des pertes au sens strict (ruissellement, volatilisation, dénitrification), des réactions d'échange et d'immobilisation, enfin, des modifications dans l'équilibre ammoniac-ammonium liées aux conditions locales de pH (alcalinisation plus réduite et plus brève aux faibles doses).

Il semble que l'utilisation de l'azote engrais résulte de deux facteurs interagissants :

- la capacité de prélèvement par le végétal, qui dépend tant du stress initial que du développement ultérieur de la plante. Si cette capacité demeure insuffisante, une demi-dose sera mieux utilisée qu'une dose car l'importance relative des

pertes sera limitée, et ce, surtout dans le cas de la perlurée ;

– la disponibilité de l'engrais, qui dépend tant de la forme d'engrais que de la dose. Ce deuxième facteur est vraisemblablement lié aux conditions locales de pH à l'interface racine-sol et à l'équilibre ammoniac-ammonium de la solution du sol. Ces conditions locales seront plus favorables pour les supergranules d'urée que pour la perlurée d'une part, par dose que par demi-dose d'autre part.

TABLEAU II Quantités d'azote ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$).

Traitements	Total	Grain	Paille
SGU10	6,46 BCD	4,86 BC	1,59 AB
SGU20	7,76 A	6,04 A	1,72 A
SGU30	7,60 A	5,98 A	1,61 AB
SGU12	6,87 ABC	5,40 AB	1,47 ABC
SGU23	7,38 AB	5,62 AB	1,76 A
SGU13	7,83 A	6,25 A	1,59 AB
PER10	5,76 D	4,40 CD	1,35 ABC
PER20	6,41 BCD	4,97 BC	1,44 ABC
PER30	6,93 ABC	5,45 AB	1,48 ABC
PER12	5,99 CD	4,88 BC	1,11 CD
PER23	5,71 D	4,49 CD	1,22 BC
PER13	5,69 D	4,38 CD	1,32 ABC
TEM	4,60 E	3,71 D	0,89 D
M	6,54	5,11	1,43
ETR	0,59	0,47	0,21
ETM	0,26	0,21	0,09

Azote du sol

Les taux d'azote provenant de l'engrais (Ndff) permettent de calculer les quantités d'azote engrais mobilisées dans chaque traitement. Par différence avec la quantité totale d'azote exportée, la contribution de l'azote du sol peut être évaluée. Pour chaque traitement, l'écart entre cette quantité d'azote du sol et la quantité totale d'azote exportée par le témoin ne recevant pas d'engrais azoté permet d'estimer à la récolte soit un effet de stimulation de la prise d'azote du sol si la différence est positive, soit un effet dépressif dans le cas contraire.

Étant donné les imprécisions liées aux mesures isotopiques comme aux déterminations d'azote total, les valeurs présentées ne sont qu'indicatives.

Globalement, l'effet de stimulation est plus élevé pour la perlurée que pour les supergranules.

La stimulation, très faible pour les apports uniques de supergranules d'urée (SGU10 = 0,10 ; SGU20 = 0,34 ; SGU30 = 0,15 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), serait même remplacée par un léger effet dépressif pour les apports fractionnés SGU12 et

TABLEAU III a Contribution totale de l'azote engrais (Ndff %).

Traitements	Total	Grain	Paille
SGU10	27,2 B	26,7 B	28,8 B
SGU20	36,5 A	36,1 A	37,8 A
SGU30	37,5 A	36,5 A	41,1 A
SGU12	36,6 A	36,5 A	37,0 A
SGU23	38,9 A	38,2 A	41,1 A
SGU13	35,8 A	35,1 A	38,5 A
PER10	8,0 D	8,1 D	7,6 E
PER20	21,0 BC	20,1 C	24,1 BCD
PER30	24,3 BC	23,4 BC	27,5 BC
PER12	17,4 C	17,1 C	19,0 D
PER23	18,9 C	18,2 C	21,2 BCD
PER13	18,0 C	17,2 C	20,6 CD
TEM	-	-	-
M	26,7	26,1	28,7
ETR	4,15	4,32	4,48
ETM	1,86	1,93	2,00

TABLEAU III b Contribution de chaque apport d'azote engrais (Ndff %).

1 ^{er} apport	Total	Grain	Paille
SGU12	17,5 A	17,4 A	17,6 A
SGU23	17,4 A	17,5 A	17,2 A
SGU13	15,4 A	15,4 A	15,2 A
PER12	6,0 B	5,9 B	6,5 B
PER23	7,9 B	7,6 B	8,6 B
PER13	7,4 B	7,1 B	8,5 B
M	11,9	18,8	12,3
ETR	1,89	2,04	2,07
ETM	0,85	0,91	0,93
2 ^e apport	Total	Grain	Paille
SGU12	19,1 A	19,1 A	19,4 A
SGU23	21,5 A	20,7 A	23,9 A
SGU13	20,4 A	19,7 A	23,3 A
PER12	11,4 B	11,2 B	12,5 B
PER23	11,0 B	10,5 B	12,7 B
PER13	10,5 B	10,0 B	12,2 B
M	15,7	15,2	17,3
ETR	2,90	2,94	3,70
ETM	1,30	1,31	1,65

SGU23, indice d'une bonne adéquation entre l'offre et la demande, mais non pour SGU13 (0,42 %). Cette différence peut résulter d'un manque d'azote dans la phase intermédiaire de croissance. Le premier apport a permis un bon redémarrage de la végétation, mais reste insuffisant pour couvrir les besoins de la plante ; il entraîne, avec le meilleur développement du végétal, une prospection plus large de l'azote du sol, avant que le deuxième apport, trop tardif, ne prenne le relais.

Pour la perlurée, l'effet de stimulation est plus marqué pour les doses uniques que pour les doses fractionnées. Ce type de résultat est sans doute lié tant aux niveaux de disponibilité (plus importants pour les doses uniques que pour les doses fractionnées) qu'à la durée, moins étalée pour les doses uniques.

Schématiquement, on peut estimer que si un apport de perlurée au repiquage permet le redémarrage de la végétation, il devient pourtant vite insuffisant, d'où un effet de stimulation légèrement plus marqué que pour des apports tardifs.

TABLEAU IV a Coefficients réels d'utilisation de l'engrais (CRU %).

Traitements	Total	Grain	Paille
SGU10	30,2 B	22,4 B	7,8 CD
SGU20	48,4 A	37,2 A	11,2 AB
SGU30	48,8 A	37,4 A	11,4 AB
SGU12	43,2 A	33,8 A	9,4 BC
SGU23	49,3 A	36,8 A	12,4 A
SGU13	48,2 A	37,7 A	10,5 AB
PER10	7,8 D	6,1 D	1,8 G
PER20	23,2 BC	17,3 BC	5,9 DEF
PER30	28,9 B	21,9 B	7,0 DE
PER12	17,9 C	14,3 C	3,6 FG
PER23	18,4 C	13,9 C	4,4 EF
PER13	17,7 C	13,0 C	4,7 EF
TEM	-	-	-
M	31,8	24,3	7,5
ETR	5,60	4,63	1,53
ETM	2,50	2,07	0,68

TABLEAU IV b Coefficients réels d'utilisation de chaque apport d'engrais (CRU %).

1 ^{er} apport	Total	Grain	Paille
SGU12	41,2 A	32,3 A	8,9 AB
SGU23	44,0 A	33,7 A	10,3 A
SGU13	41,5 A	33,2 A	8,3 B
PER12	12,3 B	9,9 B	2,5 C
PER23	15,3 B	11,7 B	3,6 C
PER13	14,6 B	10,8 B	3,8 C
M	28,2	21,9	6,2
ETR	5,19	4,76	1,23
ETM	2,32	2,13	0,55
2 ^e apport			
SGU12	45,3 A	35,4 A	9,9 B
SGU23	54,5 A	39,9 A	14,5 A
SGU13	55,0 A	42,3 A	12,7 AB
PER12	23,4 B	18,7 B	4,8 C
PER23	21,4 B	16,1 B	5,3 C
PER13	20,9 B	15,3 B	5,6 C
M	36,7	27,9	8,8
ETR	7,58	6,02	2,31
ETM	2,50	2,69	1,03

Après un apport fractionné au repiquage, un apport à 21 JAR s'accompagnera plus tôt d'un déficit en azote qu'un apport à 42 JAR. La reprise plus précoce de l'exploitation de l'azote du sol se traduira par un effet de stimulation un peu plus élevé pour PER12 que pour PER13. Dans le cas du PER13, l'effet limité du 1^{er} apport ne se traduira pas par un déficit intermédiaire aussi marqué que pour SGU13. Enfin, le cas de PER23, proche de PER13, peut être la résultante d'un manque initial d'azote compensé par une disponibilité plus durable.

TABLEAU V Poids de matière sèche et quantités d'azote. Effets des différents facteurs.

	Poids (g/m ²)			Azote (g/m ²)		
	Total	Grain	Paille	Total	Grain	Paille
Témoin	**	**	**	**	**	**
Effet forme d'azote	**	**	**	**	**	**
Effet nombre d'apports	ns	ns	ns	ns	ns	*
Interaction forme × nombre d'apports	ns	ns	ns	*	*	ns
Effet date d'application	**	**	*	**	**	ns
Interaction forme × date	*	*	ns	ns	*	ns

** Significatif au seuil de 1 % ; * Significatif au seuil de 5 % ; ns : non significatif au seuil de 5 %.

TABLEAU VI Contribution totale de l'azote engrais (Ndff %) et coefficient réel d'utilisation de l'engrais (CRU %). Effets des différents facteurs.

	Ndff (%)			CRU (%)		
	Total	Grain	Paille	Total	Grain	Paille
Effet forme d'azote	**	**	**	**	**	**
Effet nombre d'apports	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Interaction forme × nombre d'apports	ns	ns	ns	*	*	ns
Effet date d'application	**	**	**	**	**	**
Interaction forme × date	ns	ns	ns	ns	ns	ns

** Significatif au seuil de 1 % ; * Significatif au seuil de 5 % ; ns : non significatif au seuil de 5 %.

TABLEAU VII Décomposition de Ndff (%) des deux apports (pour les seuls traitements avec apport en deux fois). Effets des différents facteurs.

	Total	Grain		Paille		
	1 ^{er} apport	2 ^e apport	1 ^{er} apport	2 ^e apport	1 ^{er} apport	2 ^e apport
Effet forme d'azote	**	**	**	**	**	**
Effet date d'application	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Interaction forme × date	ns	ns	ns	ns	ns	ns

** Significatif au seuil de 1 % ; * Significatif au seuil de 5 % ; ns : non significatif au seuil de 5 %.

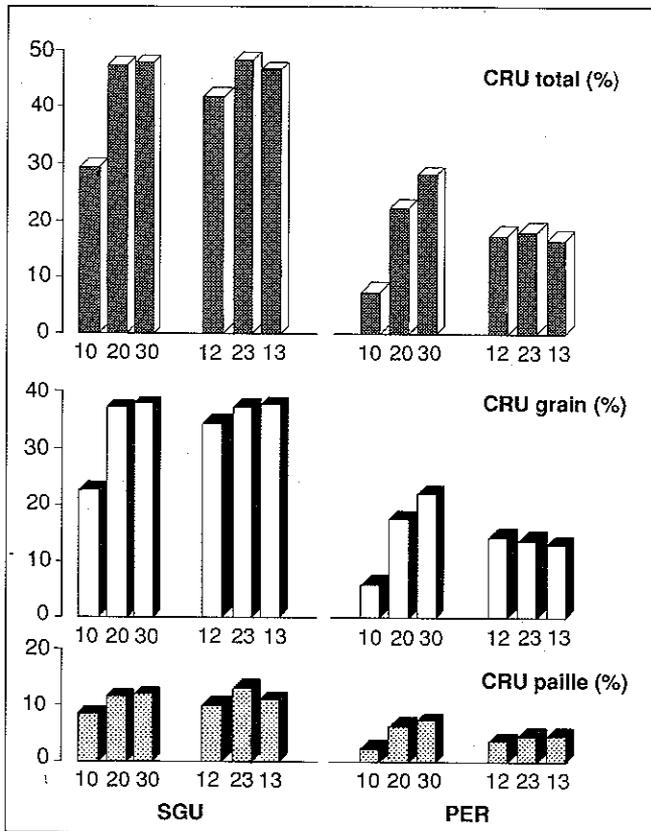


FIGURE 4: Coefficients réels d'utilisation de l'azote (CRU %) pour un apport.

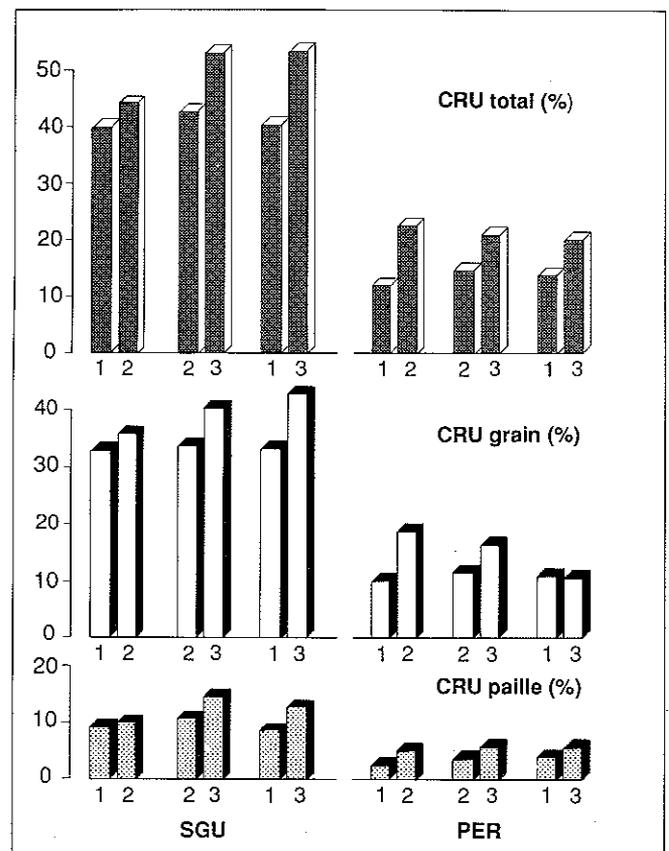


FIGURE 5: Coefficients réels d'utilisation de l'azote (CRU %) pour deux apports.

TABLEAU VIII Décomposition du CRU (%) des deux apports (pour les seuls traitements avec apport en deux fois). Effets des différents facteurs.

	Total		Grain		Paille	
	1 ^{er} apport	2 ^e apport	1 ^{er} apport	2 ^e apport	1 ^{er} apport	2 ^e apport
Effet forme d'azote	**	**	**	**	**	**
Effet date d'application	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Interaction forme x date	ns	ns	ns	ns	ns	ns

** Significatif au seuil de 1 % ; * Significatif au seuil de 5 % ; ns : non significatif au seuil de 5 %.

Conclusion

Les résultats de cet essai confirment la supériorité des supergranules d'urée par rapport à la perlurée (D'ONOFRIO *et al.*, 1985 ; DUPUY *et al.*, 1990 ; DE DATTA, 1981 ; SAVANT *et al.*, 1983) et montrent l'importance de la date d'application de l'azote et, plus précisément, la faible efficacité d'un apport unique au repiquage.

Le facteur limitant peut résider dans la crise physiologique qui affecte le riz après le repiquage. Plusieurs jours seront nécessaires pour surmonter le stress induit par les opérations

successives de prélèvement dans les pépinières, de transport, et de repiquage proprement dit. Durant cette période de restauration d'une activité physiologique normale, le fonctionnement racinaire est très ralenti. Les divers phénomènes responsables des pertes d'azote ne seront pas restreints par une quelconque compétition due à l'activité racinaire. La situation est moins défavorable dans le cas des supergranules d'urée. La limitation des pertes en surface entraîne une disponibilité plus grande et plus durable de l'engrais placé en profondeur. Non seulement les coefficients réels d'utilisation, comme les taux d'intervention de l'azote engrais (Ndff), sont plus élevés pour les supergranules d'urée que pour la perlurée, mais aussi l'utilisation d'une dose de 54 kg de N · ha⁻¹ est supérieure à celle de 27 kg de N · ha⁻¹.

Différer les dates d'apport permet de réduire l'importance de ces phénomènes initiaux, caractérisés par une forte intensité des pertes et un faible prélèvement par le végétal, l'effet étant beaucoup plus net pour la perlurée que pour les supergranules d'urée.

Les résultats indiquent en revanche une absence ou une quasi-absence d'effet du fractionnement de l'apport d'azote sur les variables mesurées.

Fractionner des apports en début de cycle n'a de résultats très marqués qu'en regard d'un apport unique au repiquage, et plus encore pour la perlurée que pour les supergranules d'urée. D'autres facteurs limitants peuvent intervenir et interagir, tels que des déficits temporaires en azote entre deux dates ou des déficits permanents après un 2^e apport précoce.

Des apports plus tardifs (DE DATTA, 1981 ; SHOJI *et al.*, 1986) ne seront efficaces que s'ils peuvent être correctement exécutés, ce qui implique en particulier une bonne maîtrise de l'eau.

Ces résultats ne mettent pas en évidence d'importantes interactions forme-date.

Les écarts observés dans les rendements comme dans l'utilisation de l'azote sont sensiblement les mêmes pour les deux formes d'engrais, bien que la situation initiale soit plus défavorable pour la perlurée que pour les supergranules d'urée. Un apport unique de perlurée au repiquage est donc en valeur absolue très peu efficace.

Pour des formes d'engrais labiles, la cinétique de prélèvement d'azote par la plante nécessite une étude plus approfondie afin de confirmer l'existence d'une phase initiale de latence et d'en préciser les répercussions.

Reçu le 10 janvier 1989.
Accepté le 17 janvier 1990.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier le Programme engrais malgache/FAO pour sa contribution à la réalisation de ce travail, le service méthodologie de l'IRAT pour sa participation constructive aux analyses statistiques et à l'interprétation des résultats et les personnels techniques de l'URER d'Arivonimamo et du LRI.

Références bibliographiques

DE DATTA S.K., 1981. *Principles and practices of rice production*. Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 618 p.

D'ONOFRIO G., DUPUY J., GAUDIN R., RAVOHITRARIVO P., 1985. Effets comparés de l'application de perlurée et de supergranules d'urée sur riz inondé à Madagascar. Antananarivo, ministère de la Production agricole et de la Réforme agraire, Programme engrais malgache - FAO, 26 p.

DUPUY J., D'ONOFRIO G., GAUDIN R., 1990. Etude à l'aide enrichie en ^{15}N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. I. Comparaison entre supergranules d'urée, perlurée et solution d'urée placés à 1 cm ou 10 cm de profondeur. *L'Agron. Trop.*, 45 (1) : 3-10.

GAUDIN R., 1987. L'effet supergranule d'urée (SGU) en sols de rizière : un problème de diffusion avec échange d'ions. Essai de modélisation. Thèse de doctorat, sciences agronomiques, INPL, Nancy, 147 p.

SAVANT N.K., CRASWELL E.T., DIAMOND R.B., 1983. Use of urea supergranules for wetland rice : a review. *Fert. News*, 28 (8) : 27-35.

SHOJI S., ANDO H., WADA G., 1986. Fate of nitrogen in paddy fields and nitrogen absorption by rice plants. *Jap. Agric. Res. Q.*, 20 (2) : 127-134.

Summary

DUPUY J., GAUDIN R., D'ONOFRIO G. - Study with ^{15}N -urea on the nitrogenous fertilization of flooded rice in Madagascar. II. Effects of a single or two applications of urea supergranules or prills during the initial growth phase of flooded rice.

Timing of nitrogenous fertilizer placements in a single or two applications and its effect has been studied on flooded rice. ^{15}N -urea in the form of supergranules or prills was used at a dose of 58 kg N · ha⁻¹. When compared to a control without any nitrogen application urea supergranules gave always higher yields than did urea prills. A single placement at transplanting led to a more reduced increase in dry matter production than at 21 days and 42 days after transplanting, an application 21 days after transplanting being slightly more efficient than an application 42 days after transplanting. The effect was more marked for prills than for urea supergranules. These increases are linked to the improvements of nitrogen derived from fertilizer and actual coefficients of nitrogen recovery though these remain quite similar for delayed applications. Associating one application 21 days or 42 days after transplanting to one application at the time of transplanting improves the overall recovery of the fertilizer and more particularly of prills. Effects are more limited for one first late application. The influence of the first application on the second application is reduced. The results are discussed in terms of stress following transplanting and of levels and duration of fertilizer nitrogen availability.

Key words : *Oryza sativa*, rice, supergranules, urea prills, ^{15}N , application timing, mode of application.

Resumen

DUPUY J., GAUDIN R., D'ONOFRIO G. - Estudio por medio de urea enriquecida con ^{15}N de la fertilización nitrogenada del arroz anegado en Madagascar. II. Efectos de una sola aplicación o de dos aplicaciones de supergránulos de urea o de perlurea durante la fase inicial de crecimiento del arroz anegado.

Se ha evaluado el efecto, en el arroz anegado, de la fecha de enterramiento del abono nitrogenado, mediante una o dos aplicaciones de supergránulos o de perlurea enriquecidos con nitrógeno 15, a razón de 58 kg N · ha⁻¹. En comparación con el testigo sin nitrógeno, los aumentos de rendimiento son siempre mayores con los supergránulos de urea que con la perlurea. En el caso de una sola aplicación, el aumento de la producción de materia seca es menor si los enterramientos se efectúan en el momento del transplante que si se efectúan aplicaciones diferidas (21 y 42 días después del transplante), siendo más eficaz una aplicación 21 días que 42 días después del transplante. Este efecto es más notable con la perlurea que con los supergránulos de urea. Los aumentos se deben a considerables mejoras del nitrógeno derivado de fertilizantes y de los coeficientes reales de utilización, aunque estos últimos difieran muy poco cuando se trata de aplicaciones diferidas. Una aplicación en el momento del transplante asociada a una aplicación 21 días después del transplante permite mejor utilización global del abono, y de la perlurea en particular. Los efectos de una aplicación tardía son más limitados. La primera aplicación influye poco en la segunda. Se discuten estos resultados en términos de estrés consecutivo al transplante, así como en términos de duración y nivel de disponibilidad del nitrógeno abono.

Palabras-clave : *Oryza sativa*, arroz, supergránulos, perlurea, nitrógeno 15, fecha de aplicación, modalidades de aplicación.

Etude à l'aide d'urée enrichie en ^{15}N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar

III – Cinétique de prélèvement de l'azote apporté sous forme de supergranules d'urée ou de perlurée au repiquage du riz inondé ou 21 jours après

J. DUPUY (1), R. GAUDIN (1), G. D'ONOFRIO (2)

RÉSUMÉ — Afin de compléter les travaux entrepris sur la fertilisation azotée du riz inondé (effets de la forme, de la profondeur et de la date d'apport), une étude de la cinétique de prélèvement de l'azote par le végétal a été effectuée pour deux formes d'engrais, les supergranules et la perlurée, apportées à 10 cm de profondeur au repiquage ou 21 jours après. Cette étude confirme la mauvaise performance de la perlurée par rapport aux supergranules. Son origine réside dans l'importance des pertes initiales, dont l'incidence est renforcée par les faibles niveaux d'assimilation de l'azote immédiatement après le repiquage d'une part, et par un déficit ultérieur entraînant une remobilisation de l'azote de la plante d'autre part. Pour des supergranules d'urée enfouis au repiquage, une bonne adaptation du système racinaire au gradient de concentration en $\text{NH}_4\text{-NH}_3$ permet d'atteindre temporairement des coefficients réels d'utilisation élevés. Toutefois, un déficit en azote en fin de croissance peut limiter les effets du placement. Pour les supergranules d'urée placés 21 jours après repiquage, l'efficacité maximale est moindre mais la disponibilité de l'azote de l'engrais, plus durable, conduit à des résultats voisins à la récolte pour les deux dates de placement.

Mots clés : *Oryza sativa*, riz, azote 15, urée, forme, date, cinétique de prélèvement.

Une amélioration de l'efficacité de la fertilisation azotée des rizières de bas-fond est observée après placement correct en profondeur d'une forme adéquate d'engrais telle que les supergranules (D'ONOFRIO *et al.*, 1985 ; DUPUY *et al.*, 1990a ; CAO *et al.*, 1984a ; SAVANT *et al.*, 1983 ; DE DATTA, 1981).

Au cours de la phase initiale de croissance du riz, un renforcement de cette action est obtenu en retardant la date

(1) LRI, Antananarivo, service de radioagronomie, BP 3383, Antananarivo 101, Madagascar.

(2) PEM/FAO, direction de la Vulgarisation, MPARA, Antananarivo 101, Madagascar.

d'apport d'engrais plutôt qu'en fractionnant les doses (DUPUY *et al.*, 1990b).

Il semblerait qu'un stress, induit par les opérations de repiquage, puisse être à l'origine d'une phase de latence dans le prélèvement des éléments nutritifs, tandis que les niveaux et durées de disponibilité de l'azote engrais conduiraient à des déficits en azote au cours de la croissance ultérieure du riz. Afin de tenter de préciser ces phénomènes, nous avons étudié la cinétique de prélèvement de l'azote par le riz inondé.

Matériel et méthode

Dispositif expérimental

L'essai a été mis en place à Arivonimamo (au nord-ouest de Tananarive) sur un sol hydromorphe à pseudogley de surface.

Une rizière suffisamment grande et homogène, choisie en milieu paysan, a été aménagée. Six grandes parcelles (12 m x 12 m), délimitées par des diguettes (1 m de large ; 0,6 m de haut), sont alimentées indépendamment en eau. Chaque grande parcelle est subdivisée en cinq blocs séparés par des diguettes plus petites. Dans chaque bloc, chaque traitement est appliqué sur une parcelle de 2,4 m x 2,4 m, repiquée à 3 brins avec la variété 1285, à une équidistance de 0,20 m. Les placettes marquées sont constituées de quatre groupes de 4 touffes. Elles sont entourées par quatre rangées de garde. Seules les 4 touffes centrales (0,4 x 0,4 m) sont retenues pour les analyses chimiques et isotopiques, tandis que les autres touffes marquées et les deux rangées adjacentes compléteront l'estimation de la production de matière sèche ; les autres rangées de garde seront éliminées.

A la mise en boue, une fumure de fond homogène de 90 unités de P_2O_5 et de K_2O est apportée dans toutes les parcelles.

A une dose de 54 kg de N · ha⁻¹, et avec un excès isotopique de 2,83 %, l'azote est enfoui à 10 cm de profondeur sous forme de perlurée (PER) ou de supergranules (SGU), soit au repiquage (0 JAR), soit 21 jours plus tard (21 JAR). Les apports se font après un drainage partiel (arrêt de l'irrigation 24 heures avant apport, remise en eau progressive).

Une grande parcelle est récoltée à chacune des dates suivantes : 32, 52, 73, 93, 114 et 126 JAR (maturité physiologique).

Ce protocole ne permet pas de dissocier un effet terrain de l'effet date de récolte. Il a cependant été retenu, pour des raisons d'ordre pratique, afin d'éviter les perturbations entraînées par la collecte des échantillons aux différentes dates, et d'en simplifier l'exécution. A posteriori, l'absence d'accident remarquable sur les courbes de croissance peut être considéré comme un indice d'homogénéité des parcelles.

Analyses chimiques et isotopiques

Elles sont conduites selon les protocoles décrits antérieurement (DUPUY *et al.*, 1990a). Soulignons que, dans cet essai cinétique, les résultats présentés sont des moyennes de cinq répétitions.

Les analyses statistiques, réalisées à l'aide du logiciel STATITCF, comprennent une analyse de variance et des comparaisons multiples de moyennes (test de Newman et Keuls au seuil de 5 %). Elles sont résumées dans les tableaux I à VI.

Résultats

Production de matière sèche

L'évolution au cours du temps des quantités de matière sèche est reportée sur la figure 1. Dès la première date de prélèvement, la production de matière sèche est plus importante pour les traitements ayant reçu de l'azote que pour le témoin. La perlurée et les supergranules d'urée placés à 21 JAR donnent des résultats analogues, s'intercalant entre SGU00 et PER00. A la deuxième date, les quantités de matière sèche sont plus fortes pour les traitements à 21 JAR que pour les traitements à 0 JAR, quelle que soit la forme d'engrais.

Par la suite, l'effet forme devient prépondérant et les traitements ne se différencient plus à partir de la date d'apport. Des évolutions très voisines sont enregistrées pour les deux dates de placement de supergranules d'urée tandis que, par rapport à ces traitements, le traitement PER21 décroche, surtout en fin de cycle. Si initialement PER00 est comparable à PER21, les écarts se creusent dès la 3^e date, PER00 occupant une place intermédiaire entre PER21 et le témoin. Les différences entre perlurée et supergranules d'urée, peu marquées en début de croissance, s'accroissent à partir de la troisième date de prélèvement (tableau I).

Dans la phase initiale de formation des grains (date 4), PER00 donne des résultats proches de ceux des supergranules d'urée, tandis que PER21 est sensiblement moins efficace. Aux dates ultérieures, l'effet de PER00 s'atténue. A la récolte, les rendements en grain (en g · m⁻²) des traitements ayant reçu de l'azote sont plus élevés que ceux du témoin (279). Ils sont plus bas pour PER00 (337) que pour PER21 (424) tandis que SGU00 et SGU21 donnent les meilleurs résultats (526 et 551).

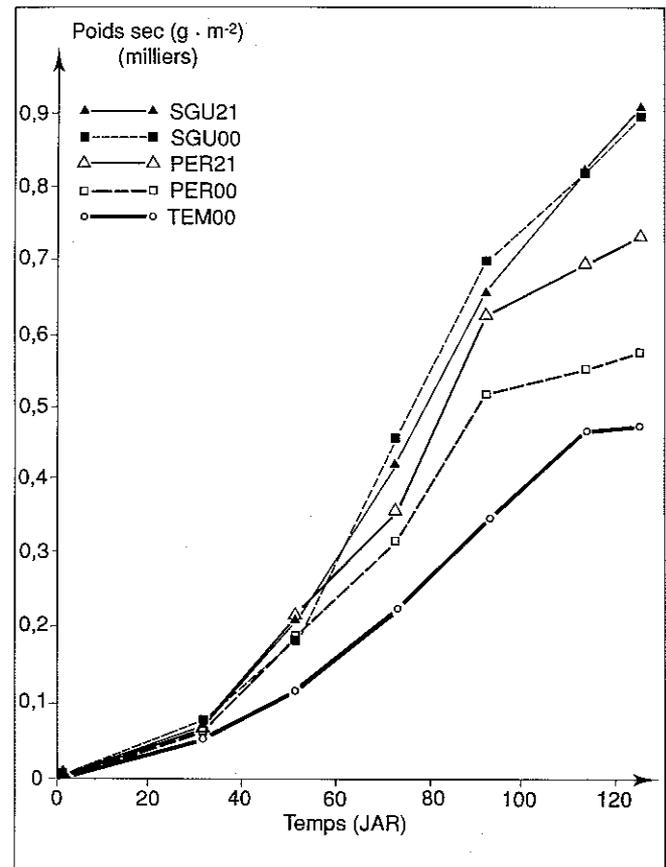


FIGURE 1 : Poids de matière sèche (g · m⁻²).

Quantités totales d'azote exportées

Lors du premier prélèvement (32 JAR, figure 2), on constate que les quantités d'azote exportées par les parties aériennes des plantes ayant reçu de l'azote sont supérieures à celles du témoin ; celles des traitements PER00 et SGU21, égales, sont inférieures à SGU00, PER21 étant en position intermédiaire. Par la suite, des comportements similaires sont observés pour PER00 et PER21, avec un ralentissement dans la phase intermédiaire de croissance. Les niveaux atteints par PER21 dépassent toujours ceux de PER00 (tableau II).

Le traitement SGU21 présente initialement une évolution proche de celle des traitements PER, mais atteint, ultérieurement, des niveaux supérieurs sans stabilisation en fin de croissance.

L'évolution des traitements ayant reçu les supergranules au repiquage est caractérisée par un accroissement des quantités d'azote pendant toute la période culturale, ralenti toutefois en fin de cycle.

TABLEAU 1 Poids de matière sèche ($g \cdot m^{-2}$).

Traitements	Parties aériennes											
	Date 1 32 JAR		Date 2 52 JAR		Date 3 73 JAR		Date 4 93 JAR		Date 5 114 JAR		Date 6 126 JAR	
Témoin	55	C	118	D	222	C	344	D	466	D	472	D
PER00	64	B	191	BC	320	B	521	C	559	C	578	C
PER21	69	AB	225	A	354	B	625	B	692	B	733	B
SGU00	77	A	183	C	462	A	705	A	830	A	896	A
SGU21	67	AB	213	AB	421	A	657	AB	824	A	911	A
M	68		186		356		570		674		718	
ETR	6,47		18,26		32,17		48,22		34,07		35,59	
ETM	2,9		8,2		14,4		21,6		15,2		15,9	
	Grain						Pailles					
	Date 4 93 JAR		Date 5 114 JAR		Date 6 126 JAR		Date 4 93 JAR		Date 5 114 JAR		Date 6 126 JAR	
Témoin	92	A	268	D	279	D	252	C	198	D	193	D
PER00	183	A	315	C	337	C	339	B	244	C	241	C
PER21	139	B	381	B	424	B	486	A	311	B	308	B
SGU00	192	A	456	A	526	A	513	A	374	A	369	A
SGU21	194	A	460	A	551	A	463	A	364	A	360	A
M	160		376		423		410		298		294	
ETR	18,38		20,46		29,41		39,06		18,86		22,61	
ETM	8,2		9,1		13,2		17,5		8,4		10,1	

M : moyenne générale ; ETR : écart-type résiduel ; ETM : écart-type des moyennes.

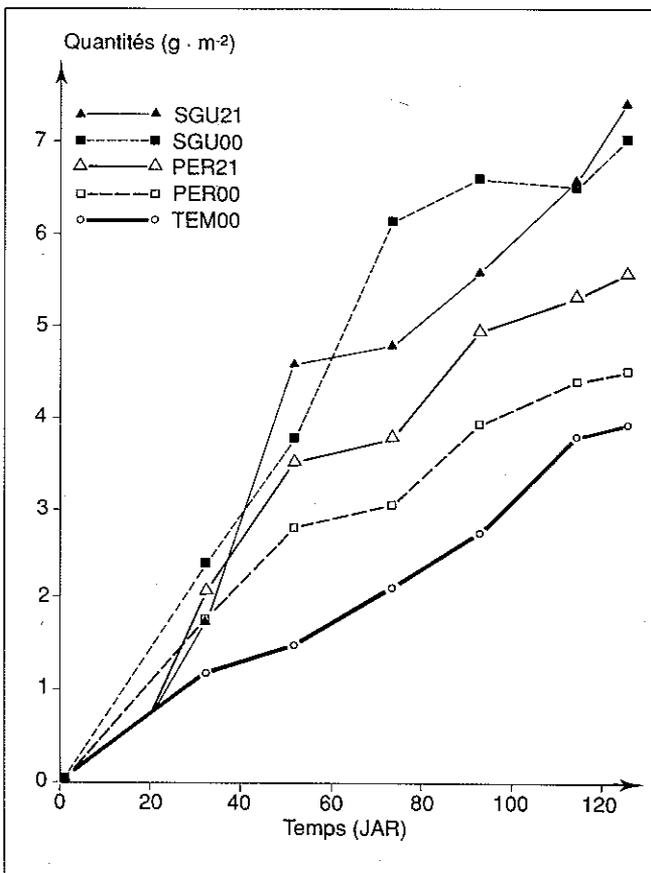


FIGURE 2 : Quantités totales d'azote ($g \cdot m^{-2}$).

Azote provenant de l'engrais

Lors du premier prélèvement, si la production de matière sèche comme les exportations d'azote sont voisines pour les apports de perlurée, la contribution de l'azote engrais (Ndff, figure 3 et tableau III) est plus importante pour un apport initial (14 %) que pour un apport différé (4 %). Toutefois, cette plus forte participation de l'engrais a des répercussions limitées puisque les coefficients réels d'utilisation (figure 4 et tableau IV), bien que différents, restent très faibles (PER00 = 4 %, PER21 = 1 %). Par la suite, les Ndff de PER21 dépassent ceux de PER00. Cette évolution de la contribution de l'engrais (tableau V) s'accompagne d'un accroissement des coefficients réels d'utilisation. Il faut noter que PER00 entraîne une exportation d'azote du sol plus forte que celle du témoin, surtout en début de croissance (figure 5a), ce qui peut être simplement lié à l'exploration d'un volume de sol plus grand par un système racinaire mieux développé.

Dans le cas de PER21, seul l'azote du sol intervient en début de croissance. La plante répond intensément et rapidement à un apport d'engrais à 21 JAR, ce qui compense les besoins initiaux que la disponibilité de l'azote du sol ne permettait pas de couvrir. Cette réponse plus marquée que pour un apport au repiquage confirme, dans ce dernier cas, que l'azote engrais est mal utilisé en début de croissance, par suite du stress induit par les opérations de repiquage, et indique, en outre, que les niveaux d'azote engrais restants doivent être trop faibles pour permettre un rattrapage

ultérieur. Entre 0 et 21 JAR, la médiocre utilisation de l'engrais s'accompagnerait de pertes importantes à l'origine d'un déficit permanent en azote, comme le montrent aussi bien les exportations de matière sèche que les taux de contribution de l'azote engrais (Ndff) et les coefficients réels d'utilisation qui, tout au long du cycle, suivent des évolutions parallèles mais plus basses pour PER00 que pour PER21.

Par rapport au témoin (figure 5b), la réponse de la plante à un apport différé de perlurée se traduit par une prospection de l'azote du sol un peu plus poussée, surtout à la date 1, ce qui correspond sans doute au plus grand développement de la plante.

Notons enfin, dans les deux situations, une réduction des quantités d'azote engrais stockées dans les parties aériennes du végétal dans la dernière phase du cycle. Ce phénomène, plus intense et plus précoce pour PER21 que pour PER00, peut s'interpréter comme une remobilisation d'azote engrais. Elle permettrait d'assurer un redémarrage du développement racinaire, s'accompagnant d'une prospection plus étendue, à un moment où la disponibilité de l'azote engrais devient critique par rapport à celle du sol.

Dans le cas des supergranules, si, à la date 1, la production de matière sèche et les exportations d'azote sont plus importantes pour SGU00 que pour SGU21, les taux d'intervention de l'azote engrais dans l'azote total (Ndff, figure 3) sont identiques (25 %). Mais les coefficients réels

d'utilisation (figure 4) sont sensiblement plus élevés pour SGU00 (10 %) que pour SGU21 (7 %).

Dès la date 2, alors que les Ndff de SGU00 et SGU21 plafonnent à 64 %, les coefficients réels d'utilisation des apports différés (50 %) dépassent ceux des apports au repiquage (42 %). Au troisième prélèvement, les Ndff de SGU00 diminuent (57 %) tandis que ceux de SGU21 restent stationnaires (63 %). Dans le même temps, les CRU de SGU00 augmentent plus nettement (63 %) que ceux de SGU21 (57 %). En fin de cycle, les Ndff de SGU00 comme ceux de SGU21 ont tendance à décroître. Cette décroissance s'accompagne d'une diminution des CRU de SGU00, tandis que les CRU de SGU21 continuent d'augmenter légèrement. Apportés au repiquage, les supergranules d'urée entraînent un meilleur développement que la perlurée, et les effets sont à la fois plus marqués et plus durables, ce qui doit correspondre tant à une plus forte utilisation de l'engrais qu'à une réduction des pertes. A 32 JAR, les quantités d'azote provenant du sol sont nettement plus élevées dans le cas de SGU00 que dans le cas de SGU21 (figures 5c et 5d et tableau VI). Elles diminuent au second prélèvement et restent ensuite légèrement supérieures au témoin pour SGU00, sensiblement inférieures pour SGU21.

Ce type de comportement peut se comprendre dans le cadre de la théorie du gradient de concentration en $\text{NH}_3\text{-NH}_4$ et de l'adaptation du système racinaire à ce gradient (GAUDIN, 1987, 1988 ; SAVANT *et al.*, 1982). Selon son extension, et

TABLEAU II Quantités totales d'azote ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$).

Traitements	Parties aériennes					
	Date 1 32 JAR	Date 2 52 JAR	Date 3 73 JAR	Date 4 93 JAR	Date 5 114 JAR	Date 6 126 JAR
Témoin	1,2 C	1,5 D	2,1 E	2,7 D	3,8 D	3,9 C
PER00	1,7 B	2,8 C	3,1 D	4,0 C	4,4 C	4,5 C
PER21	2,1 AB	3,5 B	3,8 C	5,0 B	5,3 B	5,6 B
SGU00	2,4 A	3,8 B	6,2 A	6,6 A	6,5 A	7,1 A
SGU21	1,7 B	4,6 A	4,8 A	5,6 B	6,6 A	7,5 A
M	1,8	3,2	4,0	4,8	5,3	5,7
ETR	0,35	0,47	0,45	0,49	0,33	0,45
ETM	0,16	0,21	0,20	0,22	0,15	0,20
	Grain			Paille		
	Date 4 93 JAR	Date 5 114 JAR	Date 6 126 JAR	Date 4 93 JAR	Date 5 114 JAR	Date 6 126 JAR
Témoin	0,9 C	2,7 D	2,9 C	1,8 C	1,1 C	1,0 C
PER00	1,9 A	3,2 C	3,4 C	2,1 C	1,2 C	1,1 C
PER21	1,5 B	3,7 B	4,2 B	3,5 B	1,7 B	1,4 B
SGU00	2,1 A	4,5 A	5,2 A	4,5 A	2,1 A	1,9 A
SGU21	2,0 A	4,6 A	5,6 A	3,6 B	2,0 A	1,9 A
M	1,7	3,7	4,4	3,1	1,6	1,5
ETR	0,24	0,19	0,39	0,48	0,21	0,14
ETM	0,11	0,08	0,17	0,21	0,09	0,06

M : moyenne générale ; ETR : écart-type résiduel ; ETM : écart-type des moyennes.

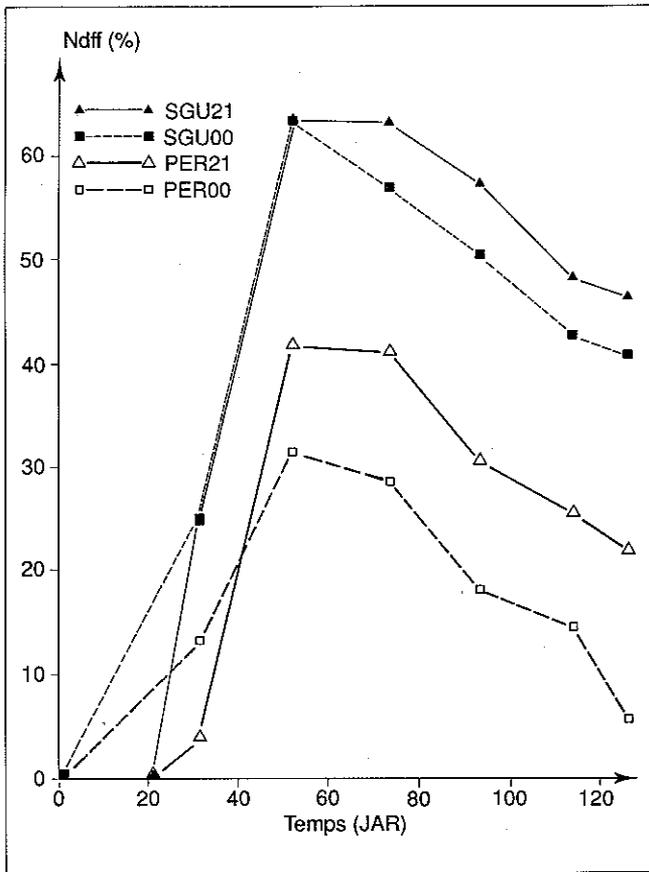


FIGURE 3 : Contribution de l'azote engrais (Ndff %).

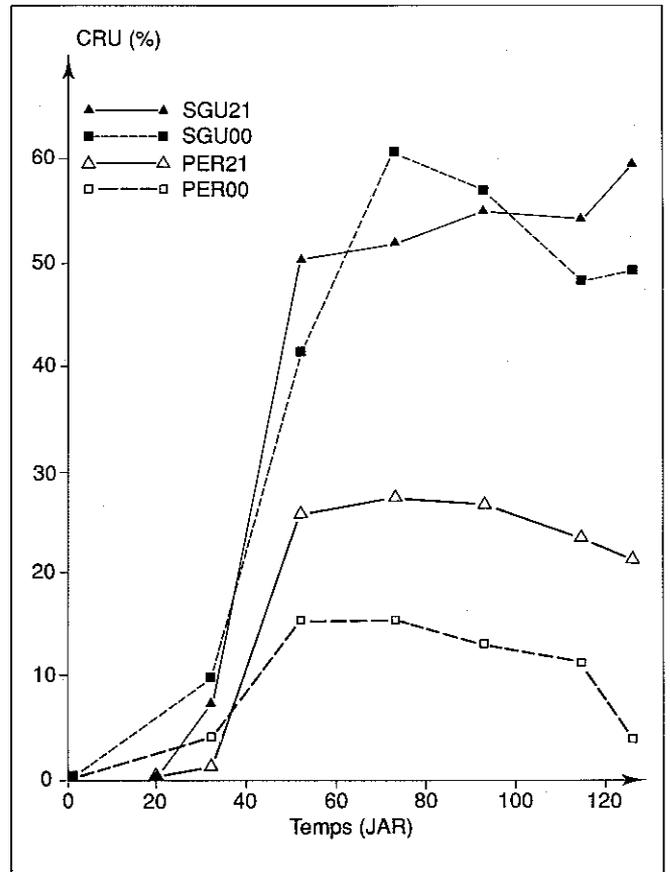


FIGURE 4 : Coefficients réels d'utilisation de l'azote (CRU %).

TABLEAU III Contribution de l'azote engrais (Ndff %).

Traitements	Parties aériennes											
	Date 1 32 JAR		Date 2 52 JAR		Date 3 73 JAR		Date 4 93 JAR.		Date 5 114 JAR		Date 6 126 JAR	
Témoïn	-		-		-		-		-		-	
PER00	13,7	B	31,7	B	29,0	C	18,2	C	14,8	C	5,7	C
PER21	3,9	C	41,8	B	41,4	B	30,9	B	25,5	B	21,9	B
SGU00	24,9	A	64,0	A	57,4	A	50,6	A	43,3	A	40,8	A
SGU21	24,7	A	63,7	A	63,2	A	57,3	A	48,2	A	46,4	A
M	16,8		50,3		47,7		39,2		33,0		28,7	
ETR	5,73		7,96		6,51		8,33		4,87		4,45	
ETM	2,56		3,56		2,91		3,73		2,18		1,99	
	Grain						Paille					
	Date 4 93 JAR		Date 5 114 JAR		Date 6 126 JAR		Date 4 93 JAR		Date 5 114 JAR		Date 6 126 JAR	
Témoïn	-		-		-		-		-		-	
PER00	18,8	B	12,8	C	5,7	C	17,5	C	19,8	D	5,6	C
PER21	23,1	B	23,3	B	21,3	B	33,9	B	30,5	C	23,2	B
SGU00	46,6	A	41,9	A	40,1	A	52,4	A	46,1	B	43,0	A
SGU21	52,3	A	45,3	A	46,3	A	60,3	A	54,9	A	46,7	A
M	35,2		30,8		28,4		41,0		37,8		29,7	
ETR	7,98		5,27		5,15		8,78		5,06		3,21	
ETM	3,57		2,36		2,30		3,93		2,26		1,44	

M : moyenne générale ; ETR : écart-type résiduel ; ETM : écart-type des moyennes.

dans la zone sub-toxique en NH_3 , l'assimilation de NH_3 nécessite une énergie minimale ; elle couvre les besoins du végétal quand le système racinaire actif dans la zone de concentration optimale en NH_3 est en proportion suffisante. Cette conception est confortée tant par les niveaux atteints par les coefficients réels d'utilisation que par les quantités totales d'azote exportées. Après une phase initiale de mise en place, s'accompagnant d'une stimulation de la prise d'azote du sol, la bonne adaptation du système racinaire au gradient de concentration se traduirait par un fort accroissement de quantités d'azote provenant de l'engrais. Ce phénomène permettrait d'atteindre, à la troisième date de prélèvement, des coefficients réels d'utilisation supérieurs à 60 %. Toutefois, cette situation favorable aura une durée limitée. Tandis que les quantités totales d'azote se stabilisent, les taux de contribution de l'azote engrais comme les coefficients réels d'utilisation chutent et, en fin de cycle, on assiste à une remobilisation d'azote encore plus marquée que dans le cas des apports de perlurée. Cette dernière étape peut être due à l'épuisement de l'azote ammoniacal en solution dans la zone du gradient où le prélèvement racinaire est actif. Le développement insuffisant ou trop localisé des racines implique une nouvelle extension pour faire face aux exigences de la plante. A un moment où les besoins du système reproducteur doivent entrer en compétition avec ceux du système végétatif, les résultats resteront limités, comme l'indiquent les faibles accroissements des quantités totales d'azote exportées à partir de la date 3.

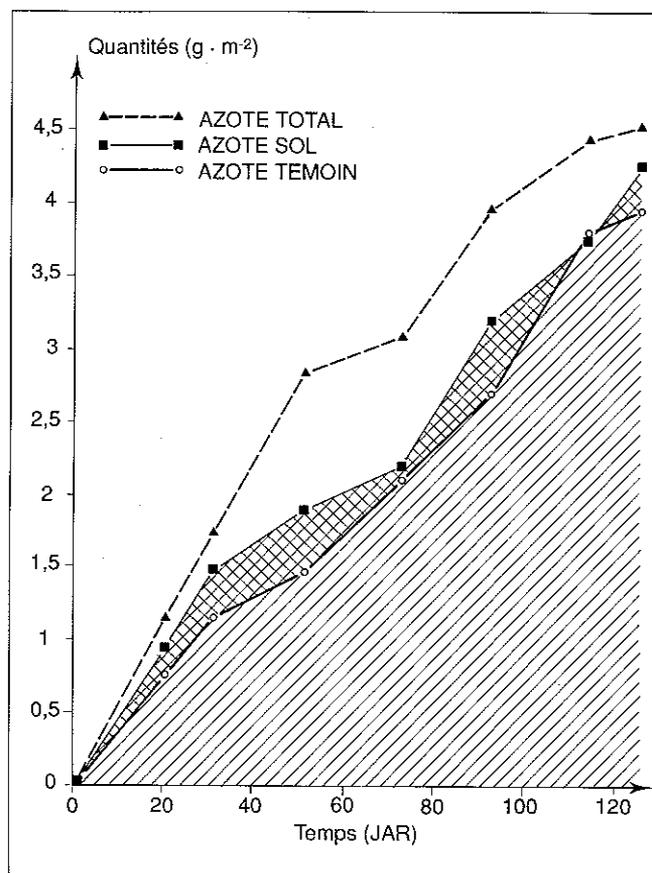
FIGURE 5 a : Bilan de l'azote du végétal ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) : PER00.

TABLEAU IV Coefficients réels d'utilisation (CRU %).

Traitements	Parties aériennes					
	Date 1 32 JAR	Date 2 52 JAR	Date 3 73 JAR	Date 4 93 JAR	Date 5 114 JAR	Date 6 126 JAR
Témoin	-	-	-	-	-	-
PER00	4,3 C	15,7 B	15,5 C	13,1 C	11,4 C	4,3 D
PER21	1,3 D	25,8 B	27,5 B	26,8 B	23,6 B	21,2 C
SGU00	9,8 A	41,8 A	60,7 A	57,2 A	48,5 A	49,3 B
SGU21	7,2 B	50,3 A	51,9 A	55,0 A	54,2 A	59,4 A
M	5,6	33,4	38,9	38,0	34,4	33,6
ETR	1,44	8,73	7,88	8,02	4,87	5,68
ETM	0,64	3,90	3,52	3,59	2,18	2,54
	Grain			Paille		
	Date 4 93 JAR	Date 5 114 JAR	Date 6 126 JAR	Date 4 93 JAR	Date 5 114 JAR	Date 6 126 JAR
Témoin	-	-	-	-	-	-
PER00	6,8 B	7,1 C	3,3 D	6,3 C	4,3 C	1,1 C
PER21	5,9 B	14,9 B	15,4 C	20,9 B	8,7 B	5,7 B
SGU00	16,7 A	32,1 A	35,6 B	40,4 A	16,3 A	13,7 A
SGU21	18,1 A	35,4 A	44,3 A	36,9 A	18,8 A	15,1 A
M	11,9	22,4	24,7	26,1	12,0	8,9
ETR	3,77	3,86	4,76	6,71	2,15	1,30
ETM	1,69	1,73	2,13	3,00	0,96	0,58

M : moyenne générale ; ETR : écart-type résiduel ; ETM : écart-type des moyennes.

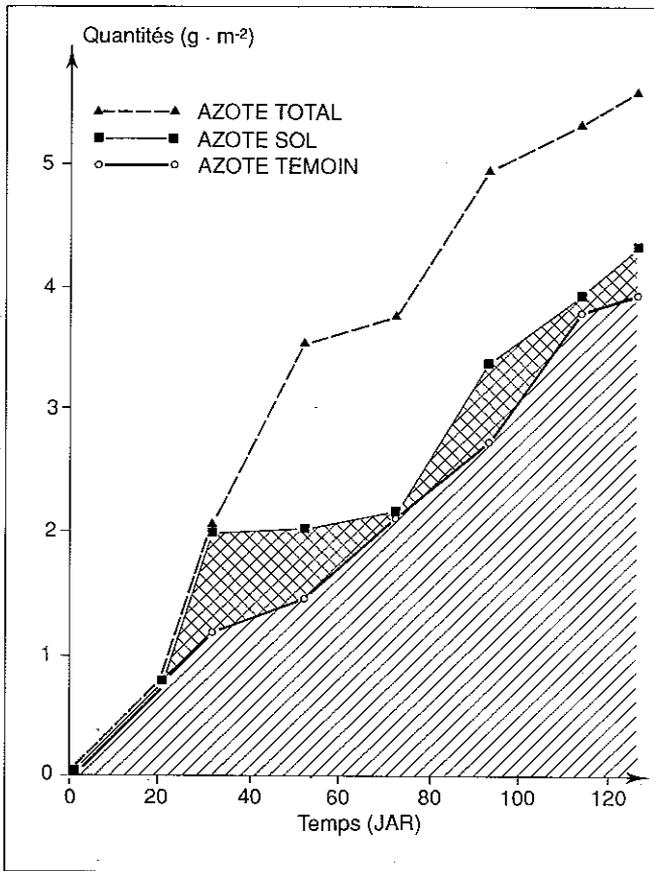


FIGURE 5 b : Bilan de l'azote du végétal (g · m⁻²) : PER21.

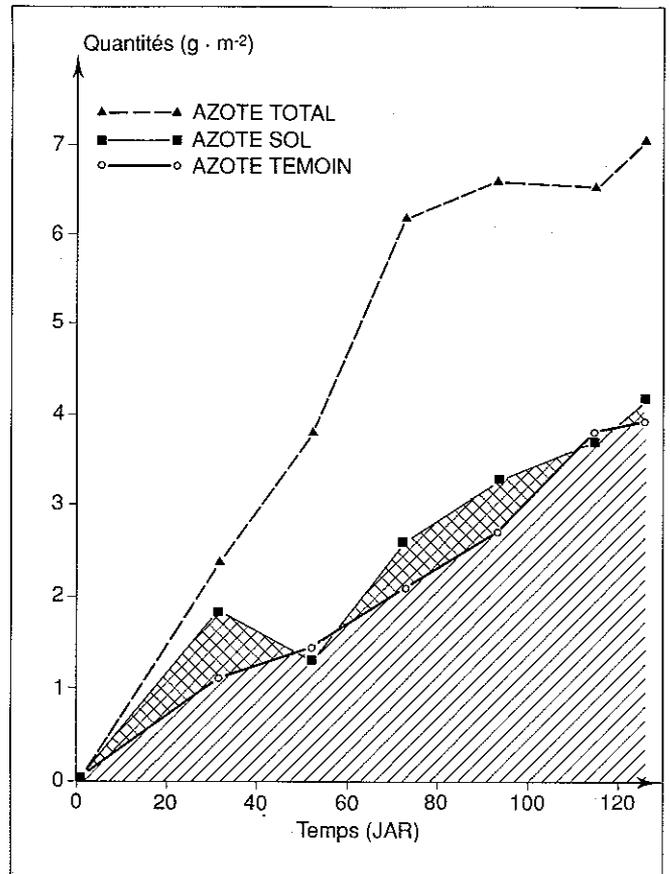


FIGURE 5 c : Bilan de l'azote du végétal (g · m⁻²) : SGU00.

TABLEAU V Azote de l'engrais (g · m⁻²).

Traitements	Parties aériennes					
	Date 1 32 JAR	Date 2 52 JAR	Date 3 73 JAR	Date 4 93 JAR	Date 5 114 JAR	Date 6 126 JAR
Témoïn	-	-	-	-	-	-
PER00	0,25 C	0,91 B	0,90 C	0,76 C	0,66 C	0,25 D
PER21	0,08 D	1,50 B	1,61 B	1,56 B	1,38 B	1,23 C
SGU00	0,57 A	2,44 A	3,54 A	3,33 A	2,83 A	2,87 B
SGU21	0,42 B	2,93 A	3,02 A	3,21 A	3,16 A	3,46 A
M	0,33	2,00	2,27	2,22	2,01	1,96
ETR	0,08	0,51	0,46	0,47	0,28	0,33
ETM	0,04	0,23	0,21	0,21	0,13	0,15
	Grain			Paille		
	Date 4 93 JAR	Date 5 114 JAR	Date 6 126 JAR	Date 4 93 JAR	Date 5 114 JAR	Date 6 126 JAR
Témoïn	-	-	-	-	-	-
PER00	0,40 B	0,41 C	0,19 D	0,36 C	0,25 C	0,06 C
PER21	0,35 B	0,87 B	0,90 C	1,22 B	0,51 B	0,33 B
SGU00	0,97 A	1,87 A	2,08 B	2,36 A	0,95 A	0,80 A
SGU21	1,05 A	2,06 A	2,58 A	2,15 A	1,10 A	0,88 A
M	0,69	1,30	1,44	1,52	0,70	0,52
ETR	0,22	0,22	0,28	0,39	0,13	0,08
ETM	0,10	0,10	0,13	0,17	0,06	0,04

M : moyenne générale ; ETR : écart-type résiduel ; ETM : écart-type des moyennes.

Dans le cas d'un placement à 21 JAR, le système racinaire, établi en début de croissance, présente des facultés d'adaptation plus limitées. Si à la deuxième date de prélèvement la contribution de l'azote engrais comme les exportations totales d'azote sont plus élevées pour SGU21 que pour SGU00, traduisant une réponse accentuée de la plante à un manque d'azote initial, ce phénomène s'atténuera rapidement. La moins bonne adaptation du système racinaire au gradient de concentration ne permettra pas d'atteindre, au troisième prélèvement, des coefficients réels d'utilisation aussi élevés que dans le cas d'un apport de supergranules d'urée au repiquage. En revanche, il en résultera une disponibilité plus durable de l'azote engrais et on n'assistera pas à une chute des niveaux d'azote engrais assimilés.

Si les caractéristiques de croissance et surtout d'accumulation d'azote sont initialement plus favorables pour le traitement SGU00, les situations finales sont voisines.

Conclusion

Dans les rizières de bas-fond où, en l'absence d'une maîtrise de l'eau suffisante, les pertes superficielles sont importantes, la perlurée est mal utilisée, même si un apport différé est plus efficace. Les quantités d'azote provenant de l'engrais plafonnent avant de décroître, indice d'une remobilisation néfaste d'azote, qui pourrait être éventuellement contrebalancée par une nouvelle fertilisation entre 50 et 60 JAR.

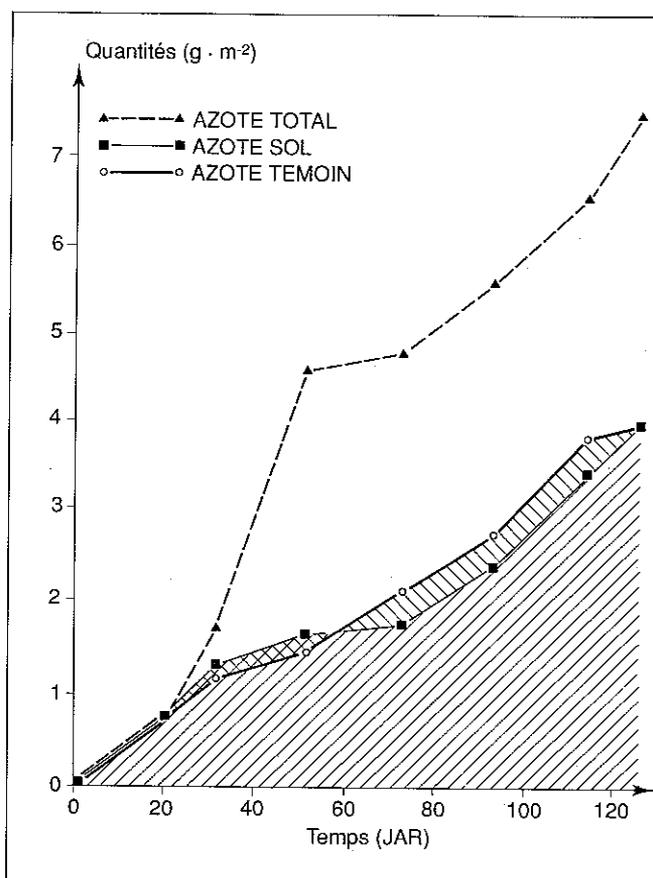


FIGURE 5 d : Bilan de l'azote du végétal (g · m⁻²) : SGU21.

TABLEAU VI Azote du sol (g · m⁻²).

Traitements	Parties aériennes					
	Date 1 32 JAR	Date 2 52 JAR	Date 3 73 JAR	Date 4 93 JAR	Date 5 114 JAR	Date 6 126 JAR
Témoin	-	-	-	-	-	-
PER00	1,50	1,92 A	2,19 B	3,23 A	3,77	4,26
PER21	1,98	2,03 A	2,18 B	3,40 A	3,95	4,36
SGU00	1,84	1,35 B	2,61 A	3,29 A	3,71	4,19
SGU21	1,32	1,66 B	1,76 C	2,39 B	3,40	4,00
M	1,66	1,74	2,18	3,08	3,71	4,20
ETR	0,40	0,27	0,22	0,42	0,31	0,41
ETM	0,18	0,12	0,10	0,19	0,14	0,18
	Grain			Paille		
	Date 4 93 JAR	Date 5 114 JAR	Date 6 126 JAR	Date 4 93 JAR	Date 5 114 JAR	Date 6 126 JAR
Témoin	-	-	-	-	-	-
PER00	1,51 A	2,77	3,20	1,71 AB	0,99 A	1,07
PER21	1,14 B	2,81	3,26	2,26 A	1,15 A	1,10
SGU00	1,11 B	2,59	3,13	2,18 A	1,12 A	1,06
SGU21	0,97 B	2,50	2,99	1,43 A	0,90 A	1,00
M	1,18	2,67	3,14	1,89	1,04	1,06
ETR	0,12	0,21	0,36	0,36	0,13	0,12
ETM	0,05	0,09	0,16	0,16	0,06	0,05

M : moyenne générale ; ETR : écart-type résiduel ; ETM : écart-type des moyennes.

Le placement correct de l'engrais permet de réduire ce type de phénomènes. Sa présentation sous forme de supergranules présente en outre l'avantage considérable d'être à l'origine de la formation d'un gradient en $\text{NH}_3\text{-NH}_4$ et d'une adaptation du système racinaire très favorable à la croissance de la plante.

Cette étude cinétique montre que, après une phase de latence initiale, les vitesses de prélèvement de l'azote engrais sont très fortes. Les taux d'accumulation d'azote engrais n'atteignent leurs niveaux maximaux que plus d'un mois après le repiquage. Toutefois, ils ne demeurent élevés que pendant une période assez courte, de trois semaines environ (YONEMAYA, 1986). Cette observation va dans le même sens que les mesures réalisées sur l'évolution des teneurs en N-ammoniacal de la solution du sol (GAUDIN, 1987, 1988).

Elle a permis, en outre, de mettre en évidence, dans certaines situations défavorables, une remobilisation d'azote. En particulier, si un apport de supergranules d'urée au repiquage est potentiellement très efficace, il semblerait qu'un manque d'azote se fasse sentir en fin de croissance.

Il serait intéressant de poursuivre cette recherche par l'analyse d'apports fractionnés de supergranules d'urée marqués, étalés sur une plus longue période que celle retenue dans nos essais précédents. Cela permettrait de voir si les coefficients réels d'utilisation comme les rendements résultant d'un premier apport au repiquage complété par un second apport environ deux mois plus tard seront sensiblement améliorés par rapport à une même dose fournie en une seule fois 21 jours après le repiquage. Dans ce dernier cas, il est à noter que les effets d'un apport fractionné resteront vraisemblablement plus limités, dans la mesure où la présence d'azote engrais paraît plus durable, bien qu'à des niveaux de disponibilité peut-être trop faibles.

Les informations apportées par ces études cinétiques mériteraient d'être complétées par l'analyse de l'évolution et de la répartition des différentes formes d'azote dans la plante au cours du stockage et de la remobilisation éventuelle. Il serait souhaitable de pouvoir évaluer l'adaptation du système racinaire et de mesurer, pour la fraction concernée, les vitesses d'intégration d'azote, parallèlement aux études conduites sur la solution du sol. Ce type de recherche pourrait permettre d'aborder les problèmes posés par les sols répondant mal aux fertilisations en relation avec les phénomènes de toxicité liés à l'abondance de composés réduits (Fe, Mn) dans des situations d'hydromorphie quasi permanente, rencontrées régulièrement dans certaines zones des bas-fonds.

Notons enfin qu'il serait nécessaire d'associer aux bilans réalisés sur le végétal des bilans totaux de l'azote du sol afin de quantifier les pertes comme les réactions d'échanges et d'immobilisation (FILLERY et VLEK, 1986 ; SCHÖN *et al.*, 1985 ; CAO *et al.*, 1984b ; KEERTHISINGHE *et al.*, 1984). L'incidence de ces phénomènes dépendra tant des types de sol et des régimes hydromorphiques que de la géométrie du placement ; un apport ponctuel s'accompagnant de très fortes concentrations en NH_4 et NH_3 dans un très faible volume,

localement, la saturation complète des sites d'échange ou d'immobilisation ne représentera qu'une fraction très faible de l'azote en solution, qui peut atteindre plusieurs centaines de parties par million (ppm), tandis qu'à contrario la libération ou les échanges ultérieurs pourront jouer un rôle non négligeable quand les niveaux d'azote ammoniacal auront rejoint ceux du témoin.

Reçu le 10 janvier 1989.
Accepté le 17 janvier 1990.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier le Programme engrais malgache/FAO, qui a contribué à la réalisation de ce travail, ainsi que les personnels techniques de l'URER d'Arivonimamo et du service de radioagronomie.

Références bibliographiques

- CAO Z.H., DE DATTA S.K., FILLERY I.R.P., 1984a. Effect of placement methods on floodwater properties and recovery of applied nitrogen (^{15}N -labeled urea) in wetland rice. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 (1) : 196-203.
- CAO Z.H., DE DATTA S.K., FILLERY I.R.P., 1984b. Nitrogen-15 balance and residual effects of urea-N in wetland rice fields as affected by deep placement techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 (1) : 203-208.
- DE DATTA S.K., 1981. *Principles and practices of rice production*. Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 618 p.
- D'ONOFRIO G., DUPUY J., GAUDIN R., RAVOHITRARIVO P., 1985. Effets comparés de l'application de perlurée et de supergranules d'urée sur riz inondé à Madagascar. Antananarivo, ministère de la Production agricole et de la Réforme agraire, Programme engrais malgache-FAO, 26 p.
- DUPUY J., D'ONOFRIO G., GAUDIN R., 1990 a. Etude à l'aide d'urée enrichie en ^{15}N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. I - Comparaison entre supergranules d'urée, perlurée et solution d'urée placés à 1 cm ou 10 cm de profondeur. *L'Agron. Trop.*, 45 (1) : 3-10.
- DUPUY J., D'ONOFRIO G., GAUDIN R. 1990 b. Etude à l'aide d'urée enrichie en ^{15}N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. II - Effets d'un apport unique ou de deux apports de supergranules d'urée ou de perlurée au cours de la phase initiale de croissance du riz inondé. *L'Agron. Trop.*, 45 (1) : 11-19.
- FILLERY I.R.P., VLEK P.L.G., 1986. Reappraisal of the significance of ammonia volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields. *Fert. Res.*, 9 (1-2) : 79-98.
- GAUDIN R., 1987. L'effet supergranule d'urée (SGU) en sols de rizière. Un problème de diffusion avec échange d'ions. Essai de modélisation. Thèse de doctorat, sciences agronomiques, INPL, Nancy, 147 p.
- GAUDIN R., 1988. L'ammoniac NH_3 , une clé pour comprendre l'efficacité des supergranules d'urée en riziculture irriguée. *L'Agron. Trop.*, 43 (1) : 30-36.
- KEERTHISINGHE G., MENGEL K., DE DATTA S.K., 1984. The release of non exchangeable ammonium (^{15}N labelled) in wetland rice soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 (2) : 291-294.

SAVANT N.K., DE DATTA S.K., CRASWELL E.T., 1982. Distribution patterns of ammonium nitrogen and ^{15}N uptake by rice after deep placement of urea supergranules in wetland soil. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 46 (3) : 567-573.

SAVANT N.K., CRASWELL E.T., DIAMOND R.B., 1983. Use of urea supergranules for wetland rice : a review. *Fert. News*, 28 (8) : 27-35.

SCHON H.G., MENGEL K., DE DATTA S.K., 1985. The importance of initial exchangeable ammonium in the nitrogen nutrition of lowland rice soils. *Plant Soil*, 86 (3) : 403-413.

YONEYAMA T., 1986. Absorption and assimilation of nitrogen by rice plants, a review on ^{15}N study in Japan. *Jap. Agric. Res. Q.*, 20 (2) : 121-126.

Summary

DUPUY J., GAUDIN R., D'ONOFRIO G. – Study with ^{15}N -urea on the nitrogenous fertilization of flooded rice in Madagascar. III. Uptake kinetics of nitrogen applied in the form of urea supergranules or as prilled urea at the time of flooded rice transplanting or 21 days after transplanting.

Further work on the kinetics of nitrogen uptake by the plant was carried out to complete a study initiated on the nitrogenous fertilization of flooded rice (effects of the fertilizer form, its placement depth and application time). The fertilizer used was applied in two forms : supergranules and prills placed at 10 cm in the soil at the time of transplanting or 21 days after transplanting. This study confirms that supergranules work better than urea prills. This bad performance of prilled urea is due to the important initial losses having their effect increased by a low nitrogen availability just after transplanting and to a subsequent shortage resulting in plant nitrogen remobilization. When urea supergranules are placed in the soil at transplanting temporarily high actual coefficients of recovery can be attained by a good adaptation of roots to the $\text{NH}_4\text{-NH}_3$ concentration gradient. Nevertheless, a nitrogen shortage at the end of plant growth may limit the effects of fertilizer placement. The maximum efficiency of urea supergranules applied 21 days after transplanting is reduced but the more durable availability of fertilizer nitrogen leads to quite similar results at harvest time for the two fertilizer placement dates.

Key words : *Oryza sativa*, rice, ^{15}N , urea, form, date, uptake kinetics.

Resumen

DUPUY J., GAUDIN R., D'ONOFRIO G. – Estudio por medio de urea enriquecida con ^{15}N de la fertilización nitrogenada del arroz en Madagascar. III. Cinética de extracción del nitrógeno aplicado en forma de supergránulos de urea o perlurea en el momento del transplante del arroz anegado o 21 días después.

A fin de completar los trabajos emprendidos sobre la fertilización nitrogenada del arroz anegado (efectos de la forma, de la profundidad y de la fecha de aplicación), se ha efectuado un estudio de la cinética de extracción del nitrógeno por la planta con supergránulos de urea y con perlurea enterrados a 10 cm de profundidad en el momento del transplante o 21 días después. El estudio confirma los mediocres resultados de la perlurea en comparación con los supergránulos. Se deben a las importantes pérdidas iniciales, cuya incidencia acentúan los bajos niveles de asimilación del nitrógeno inmediatamente después del transplante, por un lado, y un déficit ulterior que vuelve a provocar una movilización del nitrógeno de la planta, por otro lado. Con los supergránulos de urea enterrados en el momento del transplante, una buena adaptación del sistema radicular al gradiente de concentración de $\text{NH}_4\text{-NH}_3$ permite obtener temporalmente coeficientes reales de utilización elevados. No obstante, un déficit de nitrógeno al final del crecimiento puede limitar los efectos de la aplicación en el momento del transplante. Con los supergránulos de urea aplicados 21 días después del transplante, la eficacia máxima es menor, pero la disponibilidad del nitrógeno abono, más duradera, permite obtener resultados similares a la hora de la cosecha ambas fechas de aplicación.

Palabras-clave : *Oryza sativa*, arroz, nitrógeno 15 , urea, forma, fecha, cinética de extracción.