HAL
open science

Analyse du foncionnement d'une parcele de riz irrigué sur sol alcalin. Application à la gestion intégrée de la fertilisation azotée et du calendrier cultural dans le delta intérieur du fleuve Niger (Mali)

Mohamed Dicko

▶ **To cite this version:**

Mohamed Dicko. Analyse du foncionnement d'une parcele de riz irrigué sur sol alcalin. Application à la gestion intégrée de la fertilisation azotée et du calendrier cultural dans le delta intérieur du fleuve Niger (Mali). domain_other. Ecole nationale superieure agronomique de montpellier - AGRO M, 2005. Français. NNT : . tel-00423469

HAL Id: tel-00423469

https://theses.hal.science/tel-00423469v1

Submitted on 10 Oct 2009

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.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

N° ⌊⌊⌊⌊⌊⌊⌊⌊⌊⌊⌊

THESE

Pour obtenir le grade de docteur de l'ENSAM

Ecole doctorale : Biologie des Systèmes Intégrés, Agronomie et Environnement

Formation doctorale : Science du Sol

Présentée et soutenue publiquement par

Mohamed Dicko

Le 7 janvier 2005

ANALYSE DU FONCTIONNEMENT D'UNE PARCELLE DE RIZ IRRIGUEE SUR SOL ALCALIN. APPLICATION A LA GESTION INTEGREE DE LA FERTILISATION AZOTEE ET DU CALENDRIER CULTURAL DANS LE DELTA INTERIEUR DU FLEUVE NIGER (MALI)

---

devant le jury composé de :

Pr. B. JAILLARD	Président
Pr. J. WERY	Directeur de thèse
Dr G. BOURRIE	Rapporteur
Dr M.H. JEUFFROY	Rapporteur
Dr. S. MARLET	Examinateur
Dr G. NIZINSKY	Examinateur

Institut d'Economie Rurale – IER (Mali)

Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le développement (CIRAD) – UMR GEAU

Agro.M-Cirad-Inra

A Djeliya

et Kabirou junior

REMERCIEMENTS

Cette thèse est la consécration d'une ambition, celle de contribuer à l'amélioration de la productivité des systèmes irrigués au Mali. Elle est le fruit d'un travail d'équipe. Que les personnes de cette équipe reçoivent ma très profonde reconnaissance.

La liste est si longue que je ne pourrais citer tout le monde ici. Mais que ceux qui ne verront pas leur nom se reconnaissent à travers les autres et ce document qui est le notre pour tout ce qu'il contient de bien. J'en assume seul les insuffisances.

L'aventure a commencé au sein du PSI-Mali par un DEA encouragé par Jean Pierre BARRAL, mon petit frère blanc et Mamadou Kabirou N'Diaye. Celui là même qui a guidé mes premiers pas dans la recherche et chez qui je trouve toujours portes ouvertes au bureau comme à la maison grâce à Mariem Cissé. Tu es et tu resteras pour moi un frère et un père sur qui je sais que je peux toujours compter pour apprendre de la vie et de la recherche.

Le Pr. Jacques Wery m'a fait l'honneur de m'accueillir au sein de l'Umr_SYSTEM et a bien voulu diriger cette thèse malgré oh combien de difficultés rencontrées!!!

Florent Maraux m'a accueilli au sein du programme Agronomie du CIRAD-AMIS et a mis à ma disposition les moyens nécessaires pour la réalisation des travaux expérimentaux au laboratoire.

Serge Marlet est un autre père de cette thèse. Il a assuré une aide totale et sans faille et grâce à lui nous avons ensemble connu ce dénouement. Il n'en serait peut être pas ainsi autrement. Avec Jacques Ils m'ont appris la rigueur du travail scientifique. J'essaierai de poursuivre ainsi.

Claire-Chevassus Rosset m'a été d'un appui oh combien important dans l'analyse de mes échantillons et dans l'exécution des expérimentations au laboratoire. J'ai également bénéficié de l'expérience de Nicolas Condom et du génie de Antoine Findeling. Les travaux de terrain se sont déroulés dans des conditions financières difficiles (c'est le moins qu'on puisse dire). Sans la présence de l'excellent Daouda Konaté, cette thèse serait sans doute, vide de la totalité des données de terrain. Il a assuré le suivi et la gestion rigoureuse des échantillons que ce soit en ma présence ou pendant mes séjours à Montpellier. On apprend toujours quelque chose de cet excellent nouveau fonctionnaire. Puisse la Direction Régionale du Contrôle et de la Réglementation de Sikasso savoir profiter de ton sens pratique et de ta curiosité.

Cette thèse s'est déroulée en « sandwich » entre Niono à la Station de Recherche Agronomique (IER) et dans les rizières de l'Office du Niger et à Montpellier dans les locaux du CIRAD. Avec ici ou là que de sympathie !!!

Que seraient ces séjours montpelliérains sans Alain et Marjolaine Aventurier et mes amis sportifs Jean-Paul et Manu. J'ai aussi rencontré Michaëla Gotze toujours disponible et attentive. Je n'oublie pas Nathalie Tardieu, Véronique, Marc Schwarc et tout le personnel du laboratoire d'analyse. J'ai connu pendant très peu de temps Dominique Martinez et Pierre Diamante, mais si gentils et si disponibles

Oumar Niangado puis Alpha Maïga et Bino Témé on encouragé cette formation et donné le feu vert de l'IER pour sa réalisation. Amadou Diadié Cissé, Doré Guindo et Moussa Kané m'on encouragé et soutenu au sein du CRRA de Niono. A Niono, j'ai eu le plaisir de travailler dans la sympathique famille PSI composée de Minamba Bagayoko, Bréhima Tangara, Brahima Traoré, Adama Gadjigo, Yacouba Traoré et tout le personnel "temporaires", indispensables pour les travaux de terrain.

A toutes ces personnes je dis simplement merci du fond du cœur.

Merci à Ibrahim Dembélé et toute l'équipe SPGRN, merci à Edmond Hien et aux thésards de l'Umr_SYSTEM pour leur amitié et leur soutien dans la préparation de la soutenance. Merci à Kim, Yacouba Coulibaly de l'URDOC, aux Stahl, aux familles Diabaté, N'diaye Diop et Dicko et à Jean-Yves Jamin et sa famille. Merci à toutes les personnes que j'ai omis de citer en espérant encore une fois qu'ils se reconnaîtront dans ce travail car comme le dit-on chez nous : « à vouloir citer toutes les parties de son corps on pourrait finir par s'insulter soi-même ». Enfin merci à la coopération française, à travers son service culturel de Bamako et EGIDE de Montpellier, pour la prise en charge financière de cette thèse.

Résumé : Analyse du fonctionnement d'une parcelle de riz irrigué sur sol alcalin. Application à la gestion intégrée de la fertilisation azotée et du calendrier cultural dans le delta intérieur du fleuve Niger (MALI).

Dans les périmètres irrigués de l'Office du Niger (Mali), le contexte est caractérisé par une tendance à l'alcalinisation des sols et des performances variables de la riziculture irriguée, en relation avec l'efficience de la fertilisation azotée. L'objectif de ce travail est d'analyser les interactions entre les propriétés physico-chimiques du sol *in situ* et les modalités d'application des techniques culturales telles que la fertilisation azotée, le repiquage et la gestion de l'eau, et leur influence sur l'alimentation azotée, la croissance et le rendement du riz. L'objectif finalisé est d'identifier les pratiques culturales sur lesquelles on pourrait agir pour améliorer l'efficience des apports d'azote et le rendement dans ce contexte spécifique de sols alcalins. La démarche combine un diagnostic agronomique pour identifier les situations que l'on rencontre dans les parcelles des agriculteurs puis une analyse expérimentale au laboratoire et au champ pour analyser l'influence des principaux facteurs identifiés.

Le diagnostic agronomique effectué dans les parcelles de dix paysans de la zone a permis de classer les parcelles suivies en trois groupes en fonction de la nature des sols et de la maîtrise de la lame d'eau en riziculture irriguée. Si la nature alcaline du sol ou la mauvaise maîtrise de la lame d'eau déterminent les rendements mesurés, il reste néanmoins une forte variabilité à l'intérieur d'un même groupe en fonction des pratiques culturales. Le respect du calendrier de fertilisation azotée ou l'age des plants au repiquage apparaissent comme variables et susceptibles d'expliquer cette variabilité.

Les résultats obtenus au laboratoire en réacteur fermé et en pot de culture ont permis de mettre en évidence l'effet déterminant de la nature plus ou moins alcaline du sol et de la présence d'une lame d'eau sur la dynamique de l'azote suite à un apport d'urée. La volatilisation d'ammoniac est plus importante sur sol alcalin et en présence d'une lame d'eau. Ces pertes ne dépassent cependant pas 20% de l'azote apporté, et les pertes d'azote par dénitrification apparaissent potentiellement plus importantes en l'absence d'une lame d'eau et sur sol peu alcalin. Ces observations résultent probablement d'une activité plus importante de la microflore sur sol non alcalin et de conditions favorables à la nitrification en l'absence d'une lame d'eau. La croissance du riz en pot est très fortement affectée sur sol alcalin mais aussi dans une moindre mesure sur sol non alcalin en l'absence de lame d'eau, en relation avec la disponibilité de l'azote et le pH *in situ*.

Les résultats obtenus dans les expérimentations au champ confirment l'effet déterminant de la fertilisation azotée, du type de sol, de la gestion de lame d'eau et de leurs interactions sur l'efficience de la fertilisation azotée et le rendement du riz. Le coefficient apparent d'utilisation de l'azote est plus élevé et favorise le développement végétatif sur sols alcalins, témoignant de moindres pertes d'azote dans la mesure où la lame d'eau est maîtrisée. Par la suite, la mise en

place des organes reproducteurs et la production de grain sont affectées sur les sols alcalins, indépendamment de la nutrition azotée. Un assec de courte durée lors des apports d'engrais ne montre pas d'effet significatif sur l'efficience de l'azote et le rendement. Contraitrement à l'hypothèse de départ, le repiquage de plants âgés ne montre pas d'effet négatif sur la production ; si le tallage est affecté il semble que les plants soient en mesure de mieux s'adapter ensuite aux conditions défavorables du milieu.
Les voies d'amélioration doivent donc être recherchées par une diminution des pertes d'azote lors des apports d'engrais, principalement sur les sols non alcalins, et une minimisation des effets défavorables des pH alcalins sur la production de grain. C'est paradoxalement sur sol non alcalin que l'intérêt d'un assec de courte durée lors des apports d'engrais est le plus discutable dans la mesure où les pertes sont principalement liées à un processus de nitrification et dénitrification. Il semblerait alors préférable d'associer l'apport d'engrais azoté au maintien de conditions fortement réductrices. Sur sols alcalins, une diminution du pH *in situ* dans le sol et la lame d'eau devra être recherchée. Un pilotage raisonné des opérations culturales en fonction d'une connaissance du pH et du potentiel d'oxydoréduction serait une solution idéale. Une analyse et une modélisation plus approfondies du fonctionnement du système sol-eau-plante en conditions alcalines semblent nécessaires pour accompagner l'amélioration de la gestion des sols alcalins de l'Office du Niger.

Mots clés : sols alcalins, alcalinisation, riz, irrigation, azote, diagnostic agronomique, lame d'eau, submersion

Abstract: Analysis of the functioning of an irrigated rice field on alkali soil. Application to the integrated nitrogen fertilizer management and cultural calendar in the interior delta of the Niger (MALI).

The irrigated perimeters of the "Office du Niger" (Mali), is characterized by a tendency of soils toward alkalization and the variable yield performances of irrigated rice, as influenced by nitrogen fertilization. The objective of this study is to analyze the interactions between the *in situ* physical/chemical properties of soil and the modes of application of cultural practices such as nitrogen fertilization, rice transplanting and water management, and their influence on the nitrogen use efficiency by the rice plant, rice growth and yield. The operational objective is to identify the rice growing practices that can improve the nitrogen use efficiency in the specific context of alkaline soils. The method combines an agronomic diagnosis in other to identify factors that influence the actual situation of farmer plots and laboratory and field experiments to analyse the identified factors.
The agronomic diagnosis done in the field of ten peasants permitted to classify the plots in three groups according to the nature of soils and the floodwater management. If the alkali

nature of soil and/or the bad floodwater management practices determined the measured outputs, great yield variability within the same group remained nevertheless influenced by cultural practices. The respect of nitrogen fertilization plan and/or the age of the transplanted rice plants appear to be factors that can explain this variability.

The results of laboratory and pot experiments permitted to determine the effects of soil alkalinity and floodwater level on the nitrogen dynamics following urea topdressing. The volatilization process of ammonia is more important on alkali soil and in presence of a floodwater. This process concerns only 20% of the applied nitrogen, while denitrification appears potentially more important in the absence of a floodwater and on a less or non alkali soil. These observations are probably the results of favourable conditions for nitrification in the absence of floodwater and a more microflore activity on non alkaline soil. Without flooding, rice growth in pot is more affected on alkaline than non alkaline soil, depending on the availability of nitrogen and the *in situ* soil pH.

The results of field experiments confirmed the important effect of nitrogen application, soil type, water management and their interactions on N use efficiency and rice yield. The nitrogen use efficiency rate was much higher and resulted in more vegetative growth on alkaline soil, showing less nitrogen losses since irrigation water was well managed. Independently of N nutrition, rice reproductive organs and grain production are affected on alkaline soils. Short draining periods during fertilizer applications does not show significant effects on N use efficiency and yield. In contrast to the working hypothesis, transplanting of old rice plants does not show negative effect on rice production; even though tillering is affected, plants seem to adjust the unfavourable conditions of their new environment.

Yield improvement strategies must be sought through nitrogen management practices (reduction in N losses during applications) in non alkaline soils, and reduction in the effects of unfavourable pH on grain production in alkaline soils. In non alkaline soil, the benefit of short drainage during the period of fertilizer application is questionable since N loses are mainly related to nitrification and denitrification processes. It seems then preferable to take into account the high reducing conditions when applying N fertilizer. On alkaline soils, lowering the *in situ* pH and maintaining flood water at optimal level should be preferred. Cultural practices based on knowledge of soil pH and redox potential would be an ideal solution. A deeper analysis and modelling of soil-water-plant system seem necessary to improve management of the alkali soils of the “Office du Niger”.

Key words: alkali soils, alcalinisation, rice, irrigation, nitrogen, agronomic diagnosis, floodwater, submersion

Liste des figures

Figure 1.1 : Présentation de la zone d'étude 4
Figure 1.2 : situation climatique de la zone d'étude. 6
Figure 1.3 : évolution du rendement (A) et son évolution en fonction des quantités d'engrais (B) à l'Office du Niger. 12
Figure 1.4 : Doses d'engrais utilisé (A) et efficacité de la fertilisation azotée (B) à l'Office du Niger. 14
Figure 1.5 : transformation de l'azote dans un sol de riz irrigué par submersion..... 17
Figure 1.6 : prélèvement d'azote par la plante en conditions tropicales. 23
Figure 2.7 : Schéma d'élaboration du rendement. 32
Figure 2.8 : variabilité du pH (A) et de la CEC (B) des parcelles dans l'horizon 0-10cm. 41
Figure 2.9 : Projection des variables sur le plan 1x2. 43
Figure 2.10 : Projection des parcelles sur le plan 1X2..... 43
Figure 2.11 : variabilité du rendement au sein des groupes de parcelles. 46
Figure 2.12 : évolution du nombre de panicules en fonction de la densité d'implantation. 49
Figure 2.13 : influence de la densité de panicules sur le poids rachis dans les groupes. 49
Figure 2.14 : influence de la densité de repiquage sur l'évolution du nombre de tiges par poquets. 49
Figure 2.15 : Classification des parcelles selon l'âge et le statut azoté des plants au moment du repiquage. 52
Figure 2.16 : évolution du pH *in situ* (0-10cm) dans les parcelles A1, E1, E2 (groupe S4). 57
Figure 2.17 : évolution de l'azote minéral dans les parcelles A1, E1, et E2 (groupe S4). 57
Figure 2.18 : évolution du pH *in situ* (0-10cm) dans les parcelles D1 et D2 (groupes S3). 60
Figure 2.19 : évolution de l'azote minéral du sol (0-30cm) dans les parcelles D1, D2 du groupe S3. 60
Figure 3.20 : pH du sol mesuré *in situ* sur le sol 1 (alcalin) 73
Figure 3. 21 : pH du sol mesuré *in situ* sur le sol 2 (modérément alcalin) 73
Figure 3. 22 : pH de la lame d'eau mesuré *in situ* sur le sol1 73
Figure 3. 23 : pH de la lame d'eau mesuré *in situ* sur le sol 2 73
Figure 3. 24 : évolution du stock d'azote minéral dans le sol et la lame d'eau du sol1..... 75
Figure 3. 25 ; évolution du stock d'azote nitrique dans le sol et la lame d'eau du sol 1..... 75
Figure 3. 26 : évolution du stock d'azote minéral dans le sol et la d'eau du sol2 75
Figure 3. 27 : évolution du stock d'azote nitrique dans le sol et la lame d'eau du sol 2..... 75
Figure 3. 28 : pertes d'azote ammoniacal sur le sol1 77
Figure 3. 29 : pertes d'azote ammoniacal sur le sol2 77
Figure 3. 30 : évolution de la concentration calculée de NH3 en phase aqueuse dans la solution du sol (T2) ou dans la lame d'eau (T1 et T3) sur sol1 78

Figure 3. 31 : évolution de la concentration calculée de NH3 en phase aqueuse dans la solution du sol (T2) ou dans la lame d'eau (T1 et T3) sur sol2 78
Figure 32 : Bilan d'azote mesuré dans les flacons 79
Figure 3. 33 : pH sol mesuré dans le pot *in situ* sur le sol1 (alcalin)..... 81
Figure 3. 34 : pH de la lame d'eau mesuré *in situ* sur le sol1 (alcalin)..... 81
Figure 3. 35 : pH sol mesuré dans le pot *in situ* sur le sol2 (modérément alcalin)..... 81
Figure 3. 36 : pH de la lame d'eau mesuré *in situ* sur le sol2 (modérément alcalin) 81
Figure 3. 37 : évolution du potentiel d'oxydoréduction mesuré *in situ* dans le sol alcalin 82
Figure 3. 38 : évolution du stock d'azote minéral dans le sol 1 (alcalin)..... 83
Figure 3. 39 : évolution du stock d'azote minéral dans le sol 2 (peu alcalin)..... 83
Figure 3. 40 : évolution de la concentration calculée de NH3 en phase aqueuse (sol1) 85
Figure 3. 41 : évolution de la concentration calculée de NH3 en phase aqueuse (sol2) 85
Figure 3. 42 : évolution du stock d'azote nitrique dans les pots (sol1) 87
Figure 3. 43 : évolution du stock d'azote nitrique dans les pots (sol1) 87
Figure 3. 44 : évolution des teneurs en azote minéral dans la lame d'eau (Sol1) 89
Figure 3. 45 : évolution des teneurs en azote minéral dans la lame d'eau (Sol2) 89
Figure 3. 46 : évolution des teneurs en azote ammoniacal dans la lame d'eau (Sol1)..... 89
Figure 3. 47 : évolution des teneurs en azote ammoniacal dans la lame d'eau (Sol2)..... 90
Figure 3. 48 : évolution des teneurs en azote nitrique dans la lame d'eau (Sol1) 90
Figure 3. 49 : évolution des teneurs en azote nitrique dans la lame d'eau (Sol2) 90
Figure 3. 50 : production de matière sèche sur les sols 1 et 2 91
Figure 3. 51 : teneur du riz en azote sur les sols 1 et 2 91
Figure 3. 52 : exportation de l'azote par la plante sur les sols 1 et 2 91
Figure 3. 53 : bilan d'azote dans les pots (Sols1 et 2) 93
Figure 3. 54 : évolution du potentiel d'oxydoréduction mesuré *in situ* sur le terrain 95
Figure 3. 55 : évolution du pH *in situ* sur le terrain 95
Figure 3. 56 : évolution de la pression partielle de gaz carbonique 95
Figure 3. 57 : évolution de l'alcalinité dans le sol mesurée sur le terrain..... 96
Figure 3. 58 : évolution de l'alcalinité dans la lame d'eau mesurée sur le terrain..... 96
Figure 3. 59 : évolution de la molalité de l'ion ammonium dans la solution du sol sur le terrain..... 97
Figure 3. 60 : évolution de la molalité de l'ion ammonium dans la lame d'eau sur le terrain 97
Figure 3. 61 : évolution de la molalité de l'ion nitrate dans la solution du sol sur le terrain 97
Figure 3. 62 : évolution de la molalité de l'ion nitrate dans la lame d'eau sur le terrain..... 97
Figure 4.63 : production de grains sur les deux sols. (A) = en fonction de la gestion de la lame d'eau ; (B) = en fonction de l'âge des plants au repiquage. 111
Figure 4.64 : influence de la gestion de la lame d'eau (A), de l'âge des plants au repiquage (B) et du fractionnement d'azote sur le poids de 1000 grains. 113
Figure 4.65 : influence du pH sur le poids de mille grains. 114

Figure 4.66 : nombre d'épillets pleins en fonction des traitements (A) =gestion de la lame d'eau et (B) = âge des plants au repiquage sur les deux sols. 115
Figure 4.67 : influence des traitements sur l'épiaison. La gestion de la lame d'eau n'a pas d'effet (A) ; effet du sol sur les plants jeunes après apport d'azote (B). 117
Figure 4.68 : influence des traitements sur le tallage. 119
Figure 4.69 : influence de la gestion de la lame d'eau (A) et de l'âge des plants au repiquage sur la production de paille. 121
Figure 4.70 : influence de la gestion de la lame d'eau (A), de l'âge des plants au repiquage (B) et des apports d'azote sur indice de récolte. 123
Figure 4.71 : analyse de la relation entre le pH du sol et l'indice de récolte. 124
Figure 4.72 : évolution de la matière sèche aérienne. (A)= essai 1 ; (B) = essai 2 126
Figure 4.73 : évolution de la matière sèche aérienne sur les deux sols. (A)= essai 1 ; (B) = essai 2 127
Figure 4.74 : effet de traitements sur le statut azoté de la plante aux différents stades. 129
Figure 4.75 : influence du type de sol sur le statut azoté du riz. 130
Figure 4.76 : indice de nutrition azoté à l'initiation paniculaire pour les deux essais et en fonction de traitements. 131
Figure 4.77 : influence du pH sur l'INN à l'initiation paniculaire ; effet positif très significatif (seuil de 0,1%) et faible variabilité des valeurs. 132
Figure 4.78 : prélèvement d'azote en fonction des traitements. Effet favorable du sol 2, des plants âgés (B), mais pas de l'assec (A). 133
Figure 4.79 : influence du pH sur le prélèvement d'azote ; effet positive et significatif au seuil de 10%, mais une forte variabilité des valeurs. 134
Figure 4.80 : évolution du coefficient apparent d'utilisation de l'azote apporté 135
Figure 4.81 : influence positive et significative (1%) du pH sur l'efficience de l'azote. 136
Figure 4.82 : influence du statut azoté des plants à l'IP sur (A) le rendement et (B) la production de matière sèche total. 138
Figure A.83 : variabilité des pratiques chez les paysans suivis. xv
Figure A.84 : influence des traitements sur la dilution de l'azote xvii

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : répartition des parcelles en fonction des situations pédo-hydrauliques : choix *a priori*. 35
Tableau 2.2 : nouvelle typologie basée sur l'analyse en composantes principales. 44
Tableau 2.3 : comparaison de la moyenne des rendements dans les différents groupes tableau (2.2). 46
Tableau 2. 4 : Description du rendement et de ses composantes 47
Tableau 2.5 : Influence du statut azoté et de l'age des plants au repiquage sur le nombre de tiges. 52
Tableau 2.6 : Caractérisation des pratiques de fertilisation N et P 54
Tableau 3.7 : analyse physico-chimique des deux sols utilisés dans l'expérimentation 66
Tableau 3.8 : identification des traitements utilisés dans le cadre de l'essai en flacons..... 68
Tableau 3.9 : identification des traitements utilisés dans le cadre de l'essai en pot de culture 71
Tableau 4.10 : tableau des traitements utilisés ; la lame d'eau est gérée différemment seulement lors des apports d'azote. 107
Tableau 4.11 : tableau des traitements utilisés ; l'azote est apporté dans une lame d'eau pour tous les traitements. 107
Tableau 4.12 : corrélation entre le pH du sol et le statut azoté des plants à l'IP d'une part et les indicateurs d'efficacité des apports d'azote de la culture d'autre part 137
Tableau A.13 : Résultats des analyses de sol (échantillon composite de cinq prélèvements) xii
Tableau A.14 : simulation de la croissance du riz et recommandations pour les activités à l'aide de Ridev pour les parcelles suivies. xv

Tables des matières

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU CONTEXTE DE L'ETUDE ET DE LA PROBLEMATIQUE. 5

1.1 PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE 5

1.1.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE 5
1.1.2 CLIMAT 7
1.1.3 CARACTERISTIQUES PEDOLOGIQUES 8
1.1.4 EVOLUTION DES SOLS 9
1.1.5 EVOLUTION DES SYSTEMES DE CULTURE 11

1.2 DYNAMIQUE DE L'AZOTE ET PRELEVEMENT D'AZOTE PAR LA PLANTE, DANS LES SYSTEMES DE RIZICULTURE IRRIGUEE 18

1.2.1 ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DE L'AZOTE 18
1.2.2 UTILISATION DE L'AZOTE PAR LA PLANTE ET IMPACT DES PRATIQUES CULTURALES 22
1.2.3 INFLUENCE DES PRATIQUES DES AGRICULTEURS SUR L'ALIMENTATION DU RIZ 25

1.3 CONCLUSION : PROBLEMATIQUE ET DEMARCHE DE LA THESE 27

1.3.1 PROBLEMATIQUE 27
1.3.2 APPROCHE ADOPTEE 28

CHAPITRE 2 : ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME SOL–EAU-RIZ DANS LES PARCELLES DES AGRICULTEURS DE L'OFFICE DU NIGER. 31

2.1 INTRODUCTION 31

2.2 MATERIEL ET METHODES 34

2.2.1 DISPOSITIF ET CHOIX DES SITES 34
2.2.2 CARACTERISATION DU MILIEU 36
2.2.3 MATERIEL VEGETAL 37
2.2.4 MESURES ET OBSERVATIONS SUR LE SYSTEME BIOPHYSIQUE 37
2.2.5 METHODES D'ANALYSE DES RESULTATS 39

2.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS 40

2.3.1 CARACTERISATION DES SITUATIONS PEDO-HYDRAULIQUES 40
2.3.2 ANALYSE DE LA VARIABILITE DU RENDEMENT ET DE SES COMPOSANTES. 47
2.3.3 INFLUENCE DES SITUATIONS PEDO-HYDRAULIQUES SUR L'ELABORATION DU RENDEMENT 50
2.3.4 INFLUENCE DES PRATIQUES SUR L'ELABORATION DU RENDEMENT 51
2.3.5 INFLUENCE DES SITUATIONS PEDO-HYDRAULIQUES ET DES PRATIQUES SUR L'EVOLUTION DU pH ET DE L'AZOTE MINERAL DU SOL 58

2.4 CONCLUSION 62

CHAPITRE 3 : ETUDE AU LABORATOIRE DE L'IMPACT DE LA GESTION DE LA LAME D'EAU, DU REPIQUAGE, DES APPORTS D'AZOTE ET DE LEURS INTERACTIONS SUR LA DYNAMIQUE L'AZOTE. 64

3.1 INTRODUCTION **64**

3.2 MATERIELS ET METHODES **67**

3.2.1 LE SOL 67
3.2.2 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX 67

3.3 RESULTATS **74**

3.3.1 EXPERIMENTATION EN FLACONS 74
3.3.2 EXPERIMENTATION EN POTS 82
3.3.3 SUIVI AU CHAMP 96

3.4 DISCUSSION **98**

3.4.1 EVOLUTION DES CONDITIONS DU MILIEU 98
3.4.2 HYDROLYSE DE L'UREE 99
3.4.3 VOLATILISATION D'AMMONIAC 100
3.4.4 NITRIFICATION ET DENITRIFICATION 100
3.4.5 INTERACTIONS ENTRE LE SOL ET LA PLANTE 101

3.5 CONCLUSION **102**

CHAPITRE 4 : ETUDE EXPERIMENTALE AU CHAMP DE L'EFFET DE LA GESTION DE LA LAME D'EAU, DES APPORTS D'AZOTE ET DE L'AGE DES PLANTS SUR L'EFFICIENCE DE L'AZOTE EN RIZICULTURE IRRIGUEE. **104**

4.1 INTRODUCTION **104**

4.2 MATERIEL ET METHODE **106**

4.2.1 SOL ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX 106
4.2.2 CONDUITE DES ESSAIS 106
4.2.3 TRAITEMENT DES DONNEES 109

4.3 RESULTATS **112**

4.3.1 ANALYSE DU RENDEMENT ET DE SES COMPOSANTES 112
4.3.2 CROISSANCE DU COUVERT VEGETAL 125
4.3.3 CONCLUSION : RELATION ENTRE LE TYPE DE SOL, LES CONDITIONS D'ALIMENTATION AZOTEE ET LES COMPOSANTES DU RENDEMENT 137

4.4 DISCUSSION **140**

4.5 CONCLUSION **142**

CHAPITRE 5 : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES **144**

5.1 LES ACQUIS DE CE TRAVAIL **144**

5.2. PROPOSITION POUR L'AMELIORATION DES PERFORMANCES DE LA RIZICULTURE EN SOLS ALCALINS **146**

5.3. LIMITES ET PERSPECTIVES **147**

BIBLIOGRAPHIE **149**

ANNEXE ..... **XI**

Introduction

L'évolution actuelle de la population ouest africaine suscite une augmentation considérable des besoins alimentaires. Dans le même temps, les ressources en eau sont de plus en plus rares dans les zones arides sous l'influence d'épisodes de sécheresse fréquents et de la dégradation de la couverture végétale à l'échelle des bassins versants. Cette pression anthropique conduit à une baisse de la fertilité des sols sous l'influence de l'érosion et de la disparition progressive des périodes de jachères. Dans ces régions le recours à l'irrigation et notamment l'accroissement de la production de riz apparaît comme une des principales options permettant de faire face à ce défi.

En riziculture irriguée avec maîtrise de la lame d'eau, le facteur qui contrôle le plus le rendement est l'azote (Cassman *et al.*, 1998). Cela impose une gestion raisonnée de la fertilisation azotée pour tendre vers une efficience maximale des apports sans augmenter ses impacts sur l'environnement. En effet, la riziculture est un facteur important dans les émissions gazeuses de NH_3, de N_2O et de CH_4 vers l'atmosphère (Bouwman, 1990 ; Iserma, 1994, cités par Majumbar, 2000). Elle contribue également à la pollution des nappes par la lixiviation des nitrates si les conditions de perméabilité du sol le permettent. La tendance est en outre à un renchérissement des fertilisants azotés en relation avec l'augmentation du coût de l'énergie.

Les recommandations actuelles ne sont pas différenciées et tiennent compte uniquement du peuplement végétal. Il devient alors important d'adapter les méthodes de pilotage des intrants aux conditions locales pour permettre de réduire les coûts de production et assurer une meilleure valorisation de l'eau d'irrigation. Dans un contexte de sol alcalin, le chemin vers ces objectifs passe nécessairement par la compréhension des mécanismes bio-géochimiques impliqués dans le fonctionnement d'un tel milieu prétendument défavorable à l'agriculture.

Les sols de l'Office du Niger, comme beaucoup d'autres systèmes irrigués à travers le monde (Tyagi, 1996), sont affectés par un processus d'alcalinisation d'intensité variable, parfois très avancé. Les mécanismes impliqués dans le bilan de l'alcalinité dans cette zone sont maintenant bien connus (Marlet & N'diaye, 1998; Dicko, 1999; Condom, 2000; Marlet & N'diaye, 2002; N'diaye *et al.*, 2002). Les rendements ont sensiblement augmenté mais restent en dessous du potentiel des variétés, et de plus en plus d'engrais azotés sont utilisé alors que l'efficience de l'azote demeure très

faible (Wopereis *et al.*, 1999). Cette situation est similaire à celle de nombreuses grandes cultures à travers le monde (Tilman *et al.*, 2002) .

La question ici est de comprendre comment fonctionne le système sol-eau-plante et comment arriver à identifier des méthodes adéquates de planification ou de pilotage de la fertilisation azotée, et de permettre une amélioration de son efficience dans les conditions de l'Office du Niger. La réponse à cette question suppose une bonne compréhension du fonctionnement du système sol-riz-lame d'eau à l'échelle de la parcelle cultivée, et de l'influence des pratiques des agriculteurs. Un diagnostic agronomique sera tout d'abord réalisé. Il sera suivi par une étude au laboratoire, des principaux mécanismes intervenant dans la dynamique de l'azote suite à un apport d'urée et sous l'influence des propriétés du sol et de la gestion concomitante de la lame d'eau superficielle. Un essai en milieu contrôlé sera finalement mis en œuvre de façon à tester les différentes hypothèses identifiées dans les précédentes phases du travail.

Chapitre 1 : présentation du contexte et de la problématique de l'étude

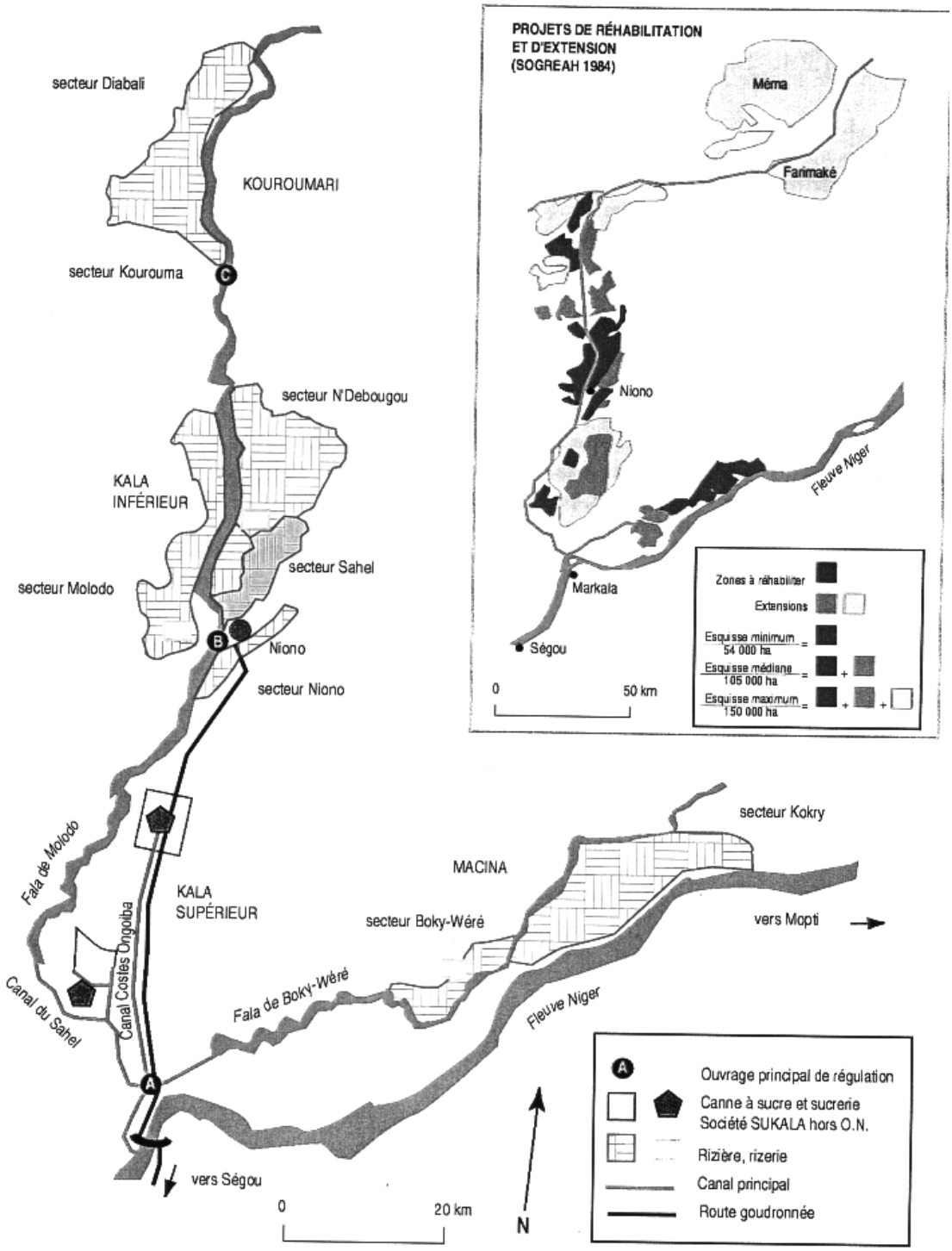


Figure 1.1 : Présentation de la zone d'étude

Chapitre 1 : présentation du contexte de l'étude et de la problématique.

1.1 Présentation générale de la zone d'étude

1.1.1 Situation géographique

L'Office du Niger (ON) est situé dans le delta intérieur du Niger qui s'étend dans la direction nord-est de Sansanding à la région des lacs. Il est limité au sud et à l'est par le fleuve Niger; à l'ouest par le marigot de Molodo et au Nord du Kouroumari par la banquette gréseuse de Sokolo.

Le marigot de Molodo est un ancien défluent tari du fleuve Niger. Un autre défluent, le marigot de Boki-wèrè chemine parallèlement au fleuve et le rejoint à l'approche de Ké-Macina.

L'Office du Niger est ainsi constitué de deux parties distinctes en relation avec leur état hydrologique (Bouyer & Dabin, 1963):

- à l'est le delta vif actuellement inondable sans la digue de protection construite le long du fleuve ; il concerne la zone de production rizicole du Macina
- les plaines septentrionales asséchées depuis longtemps, appelées delta mort, correspondant aux provinces du Kala, du Kouroumari et du Méma farimaké. Les zones de production rizicole de Niono, de Molodo, de Ndébougou et du Kouroumari se trouvent dans cette partie de l'Office du Niger.

La zone d'étude se trouve dans la zone de production rizicole de Niono dans le Kala inférieur (12°N) (figure 1.1).

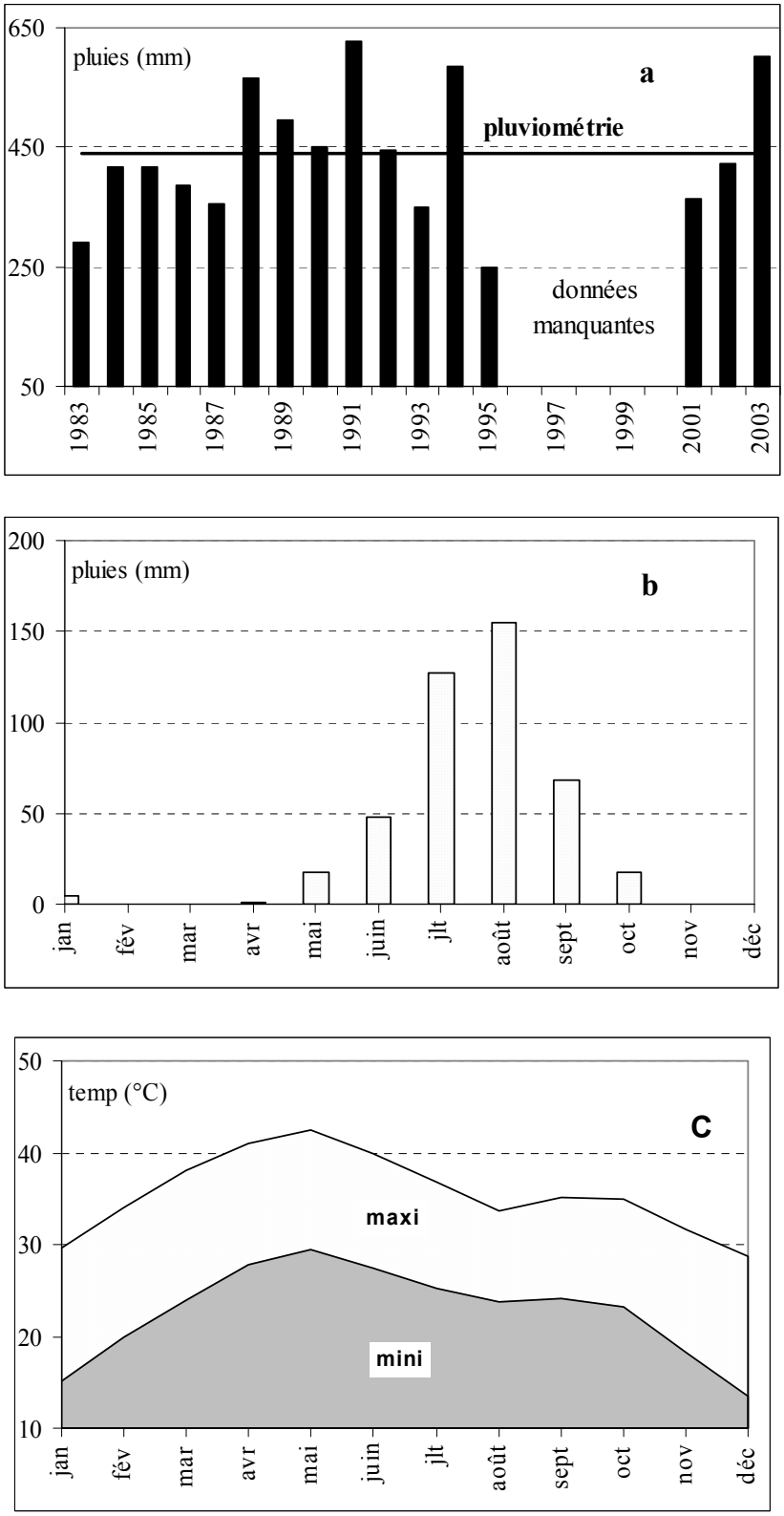


Figure 1.2 : situation climatique de la zone d'étude.

Variabilité inter-annuelle des précipitations (a), moyenne mensuelle des pluies (b), moyenne mensuelle des températures mini et maxi (c) ; (données collectées à la station météorologique de Niono Sahel, au cœur de la zone d'étude pour la période de 1983 à 2003).

1.1.2 Climat

L'Office du Niger se trouve en zone soudano-sahélienne. Le climat est semi-aride avec des précipitations variant de 300 à 600 mm et une moyenne de 430 mm/an (moyenne 1983-2003). La saison des pluies (*hivernage*) s'étale de mai à octobre avec des pluies plus importantes entre juin et septembre (figure 1.2a et b).

La saison sèche va de novembre à avril avec les températures les plus faibles entre novembre et février (18 à 34°C) et les températures les plus élevées en avril-mai (28 à 42°C). La moyenne annuelle des températures maximale est d'environ 35°C (figure 1.2c). L'amplitude thermique est très grande pendant la période froide avec des nuits froides où la température peut être voisine de 10°C.

L'évaporation potentielle avoisine les 2500 mm/an et est donc très largement supérieure au volume des précipitations (Condom, 2000). Le seul mois excédentaire est celui d'août où les quantités de pluie sont les plus fortes (1.2b).

Ces facteurs (hautes températures, faible pluviométrie et forte évapotranspiration) induisent un bilan hydrique largement déficitaire sur quasiment, toute l'année.

Le calendrier agricole est tributaire des basses températures de novembre à février à cause des risques de stérilité élevés pour les semis tardifs d'hivernage et un retard de croissance pour les semis de contre-saison froide (Dingkuhn *et al.*, 1995). Ces faibles températures peuvent aussi entraîner un rallongement du cycle avec pour conséquence une augmentation sensible des besoins en eau d'irrigation. La forte chaleur d'avril et mai entraîne également des risques de stérilité pour les semis tardifs de contre-saison.

La température apparaît ainsi comme un élément essentiel qui contrôle les possibilités de culture rizicole à certaines périodes de l'année. Ce qui nécessite d'adapter le calendrier cultural aux conditions climatiques du milieu ou de choisir les spéculations en fonction de ces conditions. Quant à la pluviométrie, elle joue un rôle marginal sur la production, en dehors des années de forte pluviométrie et surtout en fin de saison empêchant un vidage efficace des parcelles, les besoins en eau étant entièrement assurés par l'irrigation.

1.1.3 Caractéristiques pédologiques

Les sols de l'Office du Niger sont formés sur des alluvions anciennes (Dabin, 1951). Le milieu est structuré sous la forme de vastes cuvettes argileuses séparées par des bourrelets de berge. Ces cuvettes ont pu ensuite être recouvertes de façon variable par des matériaux plus grossiers : petites levées alluviales ou delta d'épandage lors de la rupture périodique des berges ainsi formées (Keita *et al.*, 1991). Les sols sont ainsi classifiés selon leur nom vernaculaire en fonction de la nature des matériaux superficiels : *Seno, danga, Dian* et *Moursi.*

Les hautes levées sableuses regroupent les sols de type *Seno*. Elles sont constituées de sables et de limons et se trouvent de part et d'autre d'anciens défluents ; elles ont souvent servi de support à l'installation des canaux d'irrigation.

Les sols de type *Danga* sont des petites levées composées de matériaux limoneux et argilo-limoneux reposant sur des dépôts argileux.

Les cuvettes de décantation ont été soumises à une longue inondation lorsque le delta mort était encore fonctionnel. Elles se composent de sols argileux présentant deux types de structures : une structure prismatique grossière (sols de type *Dian*) ou une structure à surface grenue et polyédrique fine (sols de type *Moursi*).

Le niveau de la fraction argileuse va en croissant dans l'ordre suivant des types de sols : *Seno*, *Danga*, *Dian* et *Moursi*.

Différents types d'argiles constituent ces sols. Dans les Seno et Danga l'argile est essentiellement de type kaolinitique. Dans les Dian et Moursi on trouve une proportion non négligeable d'illite, de smectite et de montmorillonite, ce qui leur confère un caractère vertique avec des fentes de retrait et une capacité d'échange cationique (CEC) élevée.

(Keita *et al.*, 1991) rapportent pour les sols du kala des teneurs en azote total variant de 0,2 à 0,6 mg/kg de sol et des teneurs en acide phosphorique inférieures à 1 mg/kg. Ces valeurs très faibles induisent des carences en azote et rendent nécessaire l'apport d'azote sous forme d'engrais déjà suggéré par (Bouyer & Dabin, 1963). Quant au phosphore, il n'aurait pas une grande incidence sur le rendement.

1.1.4 Evolution des sols

L'évolution des sols est différemment appréciée par les auteurs qui se sont intéressés à la question depuis la mise en œuvre de l'irrigation de cette partie du delta en 1937.

Selon (Bouyer & Dabin, 1963), l'évolution a été lente et peu accentuée à cause de l'aridité du climat. Ils rapportent cependant une faible stabilité structurale sur certains sols mais n'en concluent pas à une dégradation notable de leurs propriétés.

(Toujan, 1980) montre une dégradation radicale des sols trente ans après, par comparaison aux résultats de Dabin (1951). Il rapporte notamment :

- une chute de la perméabilité d'environ 300%;
- la diminution de 50% du taux d'agrégats stables;
- l'augmentation de 200 % du sodium échangeable (qui peut localement représenter environ 15 % de la capacité d'échange);
- l'augmentation du pH d'une unité pouvant localement dépasser 8,5.

Les études qui ont suivi amènent des points de vue différents voire contradictoires. (Bertrand, 1985) concluait que la situation est évolutive et pourrait être dramatique sous canne à sucre. Alors que selon (Van Hoorn, 1992) avec le niveau d'intensification actuelle permettant d'atteindre des rendements de plus de cinq tonnes par hectare de riz paddy, *« il n'est pas du tout sûr que ces phénomènes aient un caractère évolutif »* et que *« l'état actuel des terres quant à l'alcalinité et à la sodicité ne présente pas un obstacle essentiel à la montée des rendements »*. Selon lui la situation serait stable depuis longtemps pour les raisons que *la nappe est proche de la surface depuis 25 ans et qu'en rizière il existe un lessivage faible, mais suffisant pour évacuer les sels, ce qui va limiter la concentration de l'eau de la parcelle.*

Différents phénomènes sont à l'origine de cette dégradation rapide des sols de l'Office du Niger. Les eaux du fleuve Niger utilisées pour l'irrigation sont caractérisées par une alcalinité résiduelle positive (Al Droubi *et al.*, 1978; Valles *et al.*, 1987) et conduisent à une augmentation du pH des sols lorsqu'elles se concentrent. Ce processus est qualifié d'alcalinisation. Par ailleurs, les eaux de nappe sont nettement plus minéralisées et plus sodiques (SAR>30). (Bertrand *et al.*, 1993) émettent l'hypothèse que lors de sa remontée, la nappe aurait

traversé les couches sodiques de certaines alluvions qui les ont enrichies en sels.

Il existe une forte variabilité des phénomènes observés (Barral & Dicko, 1996; Marlet & N'diaye, 1998). Localement le lessivage sera moins important sur les points hauts ne recevant pas suffisamment d'eau et là où une couche argileuse peu perméable limitera la percolation. Sur les parties du champ où l'on peut maintenir une lame d'eau, le problème est plus atténué. Cela démontre l'importance du maintien d'une lame d'eau comme moyen de limiter la dégradation des sols par concentration en sels.

La variabilité est observée notamment pour le pH acide (4.22) à alcalin voire très alcalin (9.82). La conductivité électrique (CE) est faible et varie de 0.11 à 1.9 dS/m (Marlet & N'diaye, 1998).

A partir du milieu des années 80, l'Office du Niger, en vue de l'intensification de la riziculture, entreprit de réhabiliter les réseaux d'irrigation et de drainage ainsi que les parcelles rizicoles par le curage des canaux d'irrigation et de drainage, la modification du parcellaire et le planage des parcelles.

Dans la période précédant la réhabilitation des périmètres, la maîtrise de l'irrigation et du drainage était déficiente et l'alcalinité des sols argileux de cuvette a augmenté. Dans la période suivant la réhabilitation, la maîtrise de l'irrigation et du drainage a été améliorée et les cultures se sont développées pendant la contre-saison, favorisant la recharge de la nappe et les remontées capillaires sur les formations les plus perméables. Le pH des sols limono-sableux a augmenté tandis qu'il diminuait sur les sols argileux. Ces évolutions sont particulièrement sensibles dans les horizons superficiels tandis que les propriétés des horizons profonds restent partiellement héritées des évolutions antérieures (Marlet & N'diaye, 2002). D'où l'intérêt d'un drainage superficiel confirmé par (Dicko, 1999; Condom, 2000; Marlet & N'diaye, 2002; N'diaye *et al.*, 2002). En effet, l'irrigation étant assurée par des eaux peu concentrées, on assiste à une diffusion des sels vers la lame d'eau, ce qui permet leur évacuation de la parcelle par le réseau de drainage superficiel. Ainsi, les quantités importantes d'eau apportées pour l'irrigation, semblent maintenir un bilan salin équilibré à l'échelle de la parcelle.

En conclusion les sols de l'Office du Niger sont relativement pauvres qui ont, en plus, évolué vers l'alcalinisation à la suite de la mise en place de l'irrigation. Cependant, depuis le début de la réhabilitation du réseau (au milieu des années 80) cette dégradation semble freinée par la lame d'eau qu'il est désormais possible de maintenir dans les parcelles. La dégradation apparaît ainsi sous l'influence de la qualité des eaux d'irrigation et de sa gestion antérieure.

Quelle conséquence cette pauvreté des sols et la dégradation de ces propriétés physiques ont-elles eu sur l'évolution des systèmes de culture et l'utilisation des intrants?

1.1.5 Evolution des systèmes de culture

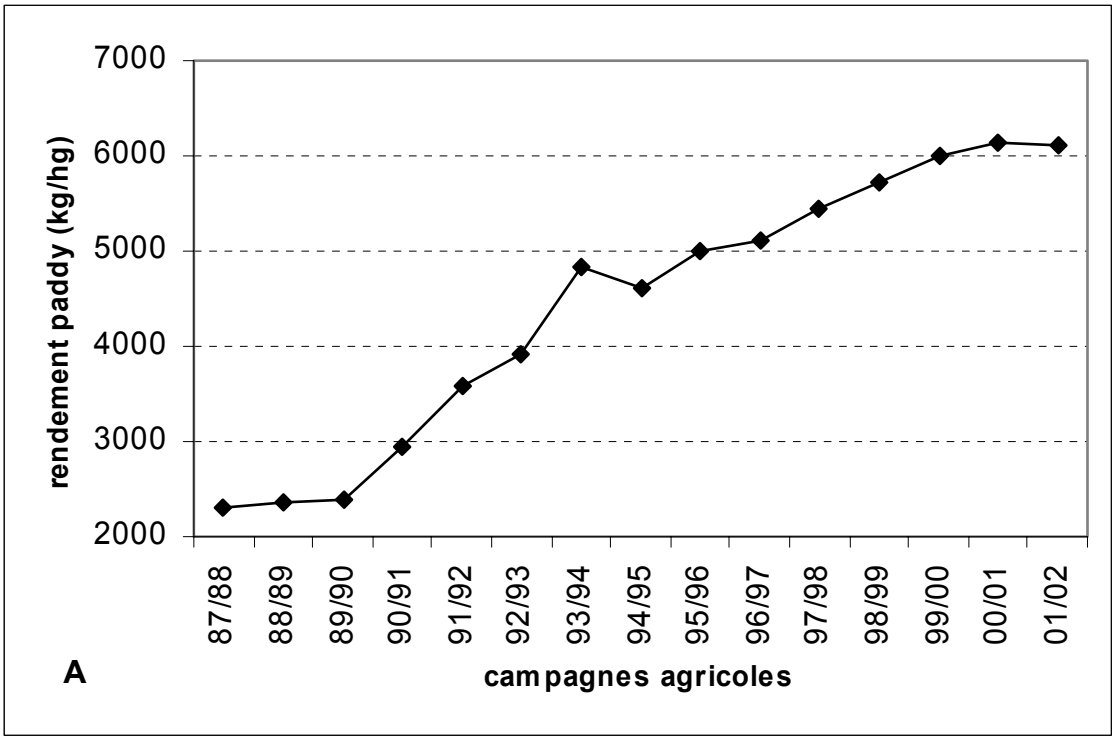
1.1.5.1 Evolution des assolements et des techniques

A l'Office du Niger le système de production était initialement basé sur le coton pour satisfaire les besoins de l'industrie textile française. Le riz n'était cultivé que pour satisfaire les besoins de consommation alimentaire locale. Avec l'abandon du coton au début des années 70 (Jamin, 1994), pour des raisons techniques et socio-économiques, le riz est devenu la principale culture.

Le mode d'implantation était basé sur le semis à la volée avec des variétés à paille haute et photosensibles. Dans ce système, le riz est semé après le labour. La parcelle est ensuite hersée. La levée est assurée par les eaux de pluie.

Suite à la pression foncière de plus en plus forte et l'ambition du gouvernement du Mali de faire de l'Office du Niger un véritable grenier pour la sous-région en augmentant la production du riz, les objectifs de l'Office du Niger sont entre autres, d'augmenter progressivement les surfaces et d'intensifier la riziculture.

La réhabilitation des années 80 répondait déjà à cet objectif d'intensification. Pour cela des variétés améliorées à haut potentiel de rendement (10 tonnes/ha) mais nécessitant de plus fortes quantités d'engrais ont été introduites (Coulibaly, 2002). Le repiquage du riz s'est imposé comme une technique permettant d'assurer une densité de plantes suffisante et une meilleure maîtrise de l'enherbement (Jamin, 1994) . En effet, la prolifération des mauvaises



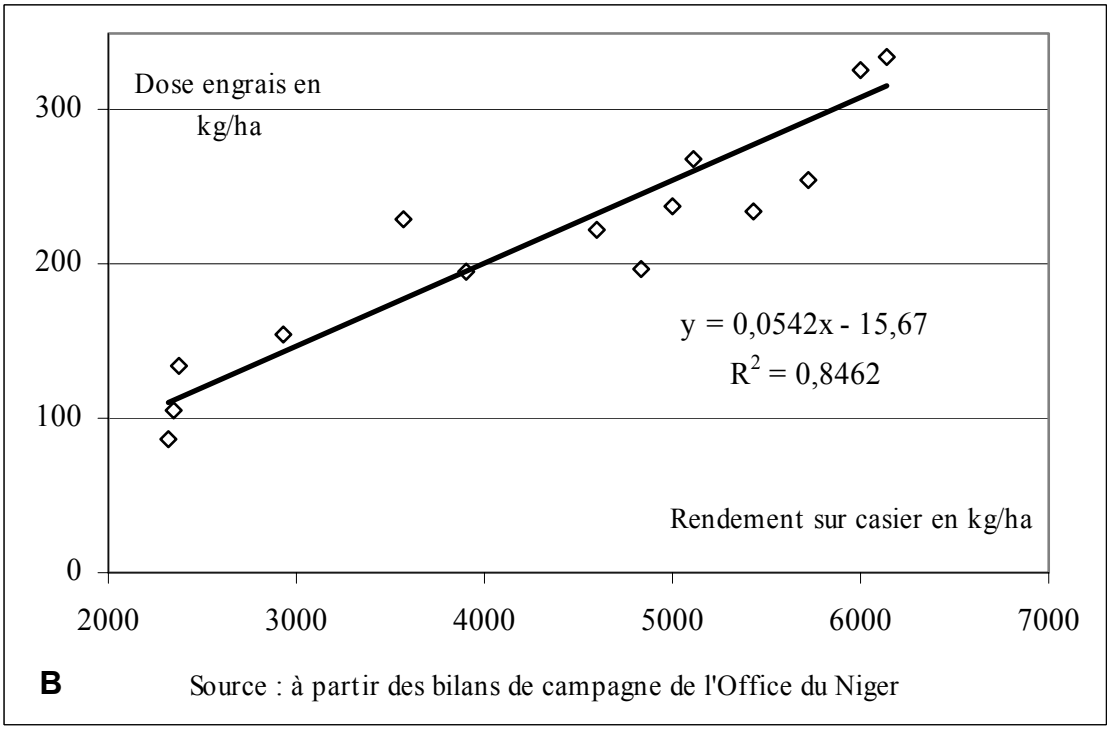


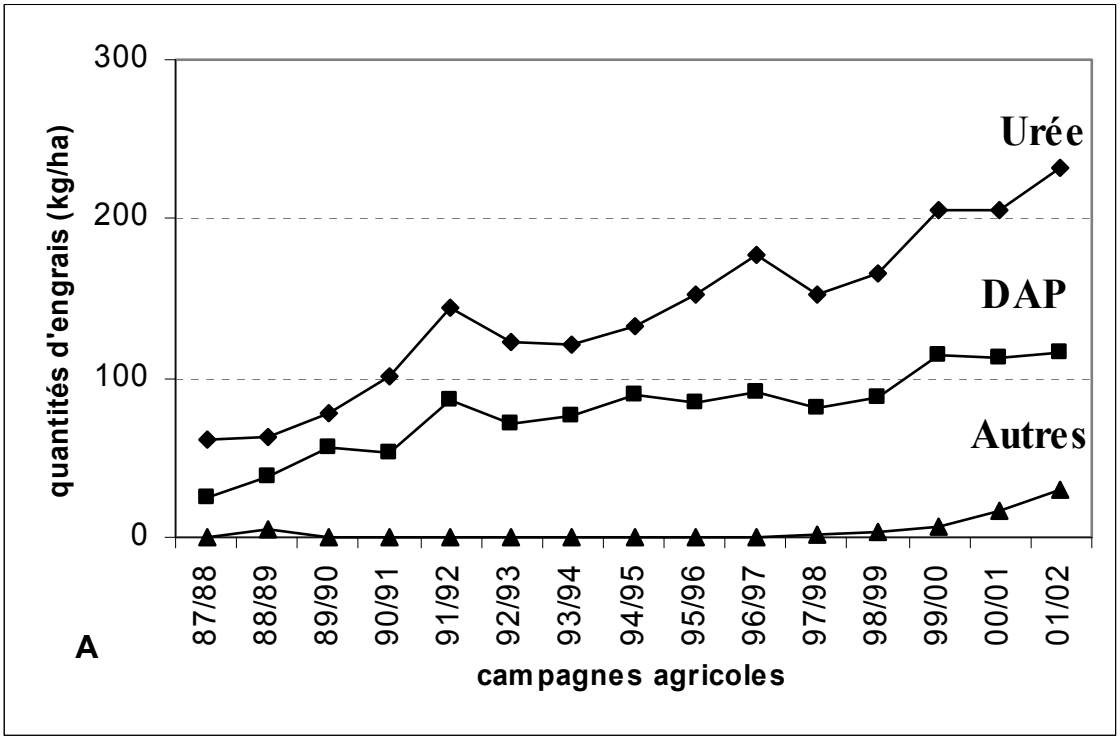
Figure 1.3 : évolution du rendement (A) et son évolution en fonction des quantités d'engrais (B) à l'Office du Niger.

Données collectées à partir du début de la réhabilitation du réseau. (Source : bilans de campagne ON).

herbes et la non maîtrise des techniques de désherbage chimique ont été identifiées comme étant les contraintes les plus importantes à l'augmentation des rendements à l'Office du Niger et dans la vallée du fleuve Sénégal (Marnotte *et al.*, 1999; Poussin *et al.*, 2003). La technique s'est généralisée et occupe actuellement la quasi-totalité des parcelles rizicoles de l'Office du Niger.
La réhabilitation a également favorisé la double culture du riz (deux cultures de riz successives dans une année). En effet, l'année se subdivise en deux parties : l'hivernage qui correspond à la saison pluvieuse et la contre saison qui correspond à la période sèche. On distingue la contre saison froide de novembre à février et la contre saison chaude de mars à mais. Les variétés de cycle court sont utilisées en contre saison et celles de cycle moyen en hivernage. Il existe également une diversification des successions culturales avec l'apparition du maraîchage dans les parcelles rizicoles en contre-saison froide.

1.1.5.2 Evolution des rendements

Malgré une dégradation des paramètres physico-chimiques des sols, les rendements de riz ont augmenté depuis les années 80 (figure 1.3A). De nombreux facteurs ont sans doute, contribué à cette augmentation. On peut évoquer entre autres, l'utilisation de plus d'engrais azoté (figure 1.3B), l'amélioration du planage permettant une meilleure maîtrise de la lame d'eau, créant ainsi les conditions du maintien du pH à des valeurs acceptables pour le riz. En effet, tant que le pH reste proche des valeurs neutres, le rendement du riz ne semble pas être affecté. La généralisation du repiquage et l'utilisation de variétés plus productives ont également pris une part importante dans cette augmentation des rendements. A ces raisons techniques s'ajoutent d'autres d'ordre socio-économique qui ont encouragé les producteurs à intensifier leurs cultures, notamment la libéralisation du marché, la sécurisation foncière et la demande d'un riz de qualité.
Cependant cette augmentation des rendements cache une variabilité très forte (2 à 7 tonnes/ha) dont les raisons ne sont pas toujours bien connues.



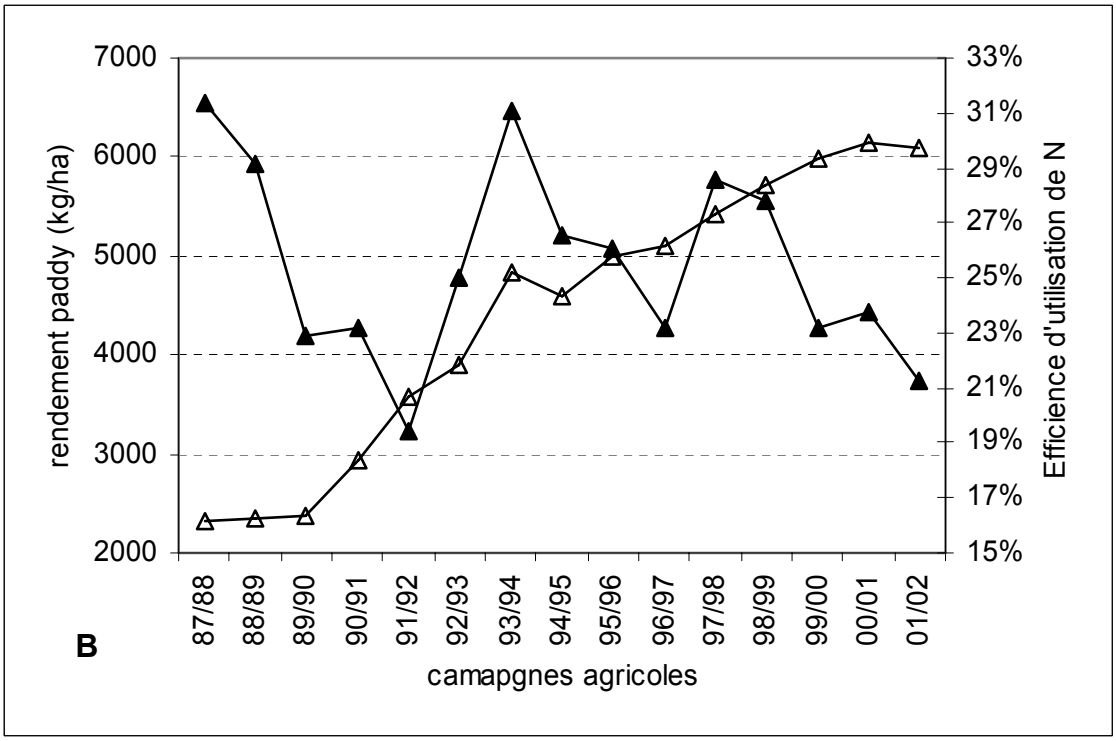


Figure 1.4 : Doses d'engrais utilisé (A) et efficacité de la fertilisation azotée (B) à l'Office du Niger.

Influence des apports d'azotes sur la production de riz paddy (A) et évolution de l'efficience des apports d'azote (B) à partir du début de la réhabilitation.

1.1.5.3 Fertilisation organo-minérale

En même temps que l'augmentation des rendements, l'utilisation des engrais azotés déjà reconnue comme essentielle dans la riziculture à l'Office du Niger (Bouyer & Dabin, 1963) a fortement augmenté, passant de moins de 100 à près de 400 kg d'engrais/ha (figure 1.4A). Ces engrais représentent près du tiers des charges de production (Donovan *et al.*, 1999; Legoupil *et al.*, 1999). Cependant, l'efficience des apports d'azote est très faible et variable (Wopereis *et al.*, 1999). Le phosphore est utilisé sous forme de DAP (di-ammonium phosphate) et est resté proche des recommandations de l'encadrement de l'Office du Niger (100 kg de DAP soit 20kg de P et 18 kg de N/ha).

Depuis quelques années, d'autres types d'engrais complexes comme ceux appelés *sukube-sukube* ont fait leur apparition. En plus de N et P, ces engrais contiennent également K, S, Mg, Ca et parfois du Zinc. Cependant, même si la prise en compte du potassium peut être actuellement envisagée avec le niveau actuel des rendements, aucune véritable recommandation n'est faite aux producteurs pour l'utilisation de cet élément.

Par ailleurs, d'après Dembélé (thèse en cours) le recyclage des résidus de récolte est très insuffisant et les quantités de fumier apportées sont faibles (moins de 600 kg/an/ha contre des recommandations de 5 à 20 t/ha). Les recherches sont actuellement orientées sur la proposition de méthodes de gestion de la fertilité basées sur la combinaison de différentes sources d'éléments nutritifs et une meilleure intégration de l'élevage dans les systèmes de production.

En dépit de la dégradation des sols, une augmentation importante du rendement est observée. Cette augmentation des rendements est concomitante avec celle de l'augmentation des doses d'azote (figures 1.3B et 1.4A). Cependant une analyse des quantités d'azote exporté pendant cette période sous forme de grains, montre que son efficience est généralement faible et toujours inférieure à 35% des apports d'azote (figure 1.4B). Le niveau actuel des rendements ne traduit pas les quantités importantes d'azote apporté sur le riz.

Quand on sait que l'achat des engrais azotés occupe une part importante des charges de l'exploitation, il importe de s'intéresser à son efficience pour des raisons économiques et environnementales.

En conclusion nous retenons que l'Office du Niger a connu de profonds changements tant dans sa structure hydraulique que dans ses systèmes de culture. Ces changements se traduisent par l'augmentation du rendement en riz paddy et cela en dépit d'une dégradation des propriétés des sols. Cette situation paradoxale ne peut s'expliquer que par les améliorations apportées dans le système de culture à la faveur de la réhabilitation du réseau. Cela se traduit par la possibilité de maintenir une lame d'eau quasi-permanente sur la parcelle induisant un lessivage des sels lors de la vidange de la parcelle et permettant une meilleure maîtrise des mauvaises herbes. Par ailleurs les processus bio-géochimiques qui se mettent en place lors de la mise en eau (oxydoréduction, augmentation de la pression partielle du gaz carbonique) favorisent la baisse du pH et la diffusion de l'alcalinité vers la lame d'eau moins concentrée, pour permettre son évacuation de la parcelle. Ces changements bio-géochimiques affectent la dynamique de l'azote, sa disponibilité pour le riz, l'efficacité des engrais apportés et les pertes d'azote sous forme gazeuse ou par lessivage et donc de leurs conséquences environnementales

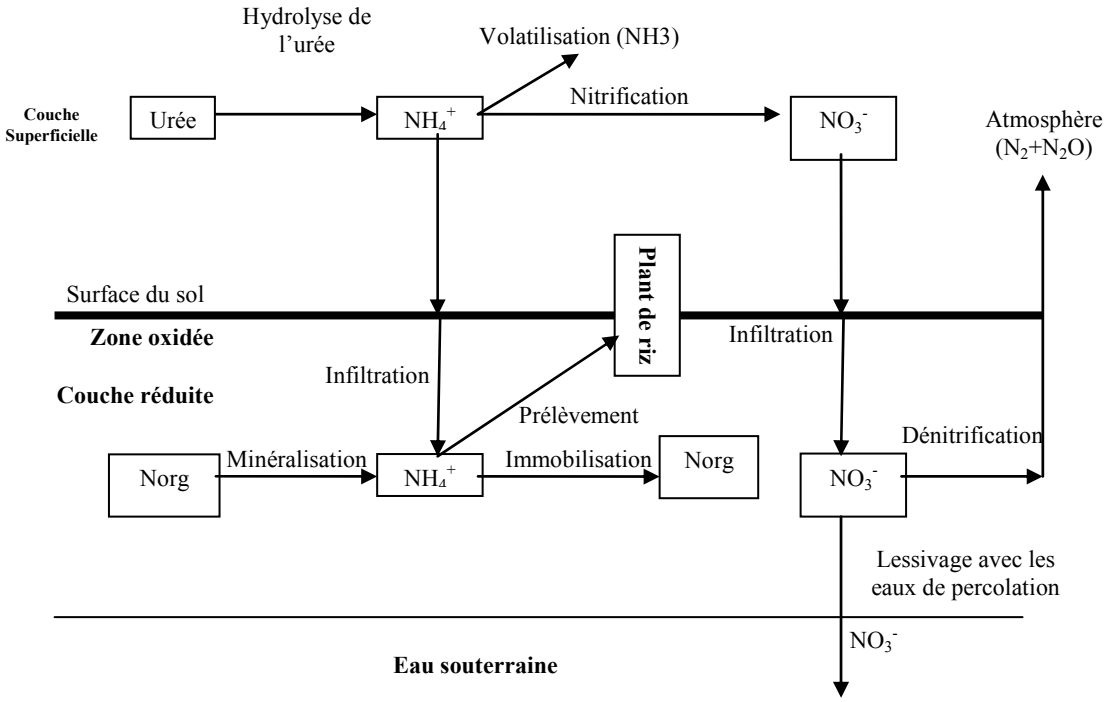


Figure 1.5 : transformation de l'azote dans un sol de riz irrigué par submersion.

(adapté d'après le schéma de Chowdary et al, 2004).

Norg = azote organique

1.2 Dynamique de l'azote et prélèvement d'azote par la plante, dans les systèmes de riziculture irriguée

1.2.1 Analyse de la dynamique de l'azote

Les différents processus impliqués dans le cycle de l'azote en riziculture irriguée par submersion ont été synthétisés par (Dobermann & Fairhust, 2000) et (Chowdary *et al.*, 2004) (figure 1.5) selon un modèle différenciant quatre compartiments du système. La **lame d'eau** superficielle représente d'abord l'interface entre le sol et l'atmosphère. Elle limite les flux d'espèces gazeuses, notamment pour ce qui concerne : le transfert d'O_2 de l'atmosphère vers la solution du sol, favorisant le développement de conditions anoxiques ; le transfert de CO_2 vers l'atmosphère, qui tend alors à s'accumuler dans le sol ; ou le transfert d'azote sous forme N_2 ou N_2O issu de la dénitrification. Les échanges entre la lame d'eau et l'atmosphère portent aussi sur la volatilisation de NH_3 en équilibre avec l'ion ammonium. Ces processus sont influencés sous riziculture par la présence d'algues dont l'activité photosynthétique consomme du gaz carbonique en contribuant ainsi à augmenter le pH dans la lame d'eau. La tendance s'inverse la nuit avec la respiration (Mikkelsen *et al.*, 1978). Elle intervient enfin dans le transfert de solutés entre le sol et la lame d'eau que ceux-ci résultent d'apport direct d'engrais azoté dans la lame d'eau ou de la diffusion de solutés de l'horizon de sol superficiel vers la lame d'eau. Dans les conditions de riziculture au champ, la lame d'eau est périodiquement renouvelée sous l'influence de la vidange des bassins, des pluies et des irrigations. L'**horizon superficiel du sol** est le siège principal des processus biologiques du fait de la présence du système racinaire et de la restitution de différents résidus organiques d'origine animale ou végétale. Sous l'influence conjuguée de ces processus biologiques et de la faible diffusion d'O_2, des conditions réductrices sont susceptibles de s'y développer et favorisent la réduction de l'azote (dénitrification) et de métaux (Mn et Fe). Elle est aussi le principal lieu de fourniture net d'azote ammoniacal lié à la minéralisation des matières organiques. On pourra distinguer une mince **couche superficielle** plus oxydée au contact avec la lame d'eau. Elle est le siège d'un processus de nitrification qui intervient aussi dans la rhizosphère. Selon (Chowdary *et al.*,

2004), la contribution de la couche de sol à l'interface entre le sol et la lame d'eau, peut être négligée à cause de la taille de cette couche (de l'ordre de 10 mm). Les **horizons sous-jacents** sont principalement le lieu de transfert des formes d'azote minéral. Les pertes attendues par lixiviation sont moindres sous forme ammoniacale soumise à des mécanismes d'adsorption. En présence d'une nappe sub-affleurante, ces écoulements peuvent être considérés comme négligeables. Ils peuvent aussi être influencés par la présence d'un horizon plus compact à son sommet.

Il existe deux principales sources d'azote pour le riz en culture irriguée. La première est constituée par les apports extérieurs sous forme d'engrais (minéral principalement) ou par la fixation du N2 atmosphérique. La seconde est constituée par la minéralisation de la matière organique.

Les pertes d'azote se font : (i) par volatilisation de l'ammoniac sous l'influence du pH, de la température et de la concentration en ammonium dans la lame d'eau en cas d'épandage en surface; (ii) par lixiviation du nitrate ; (iii) par dénitrification. Dans le cas de l'Office du Niger où la nappe est en continuité hydraulique avec la lame d'eau pendant la période de croissance du riz, on peut considérer que les pertes par lixiviation sont probablement négligeables. Cela est conforté par la faible perméabilité des sols pendant cette période (Jensen, 1994a; Barral & Dicko, 1996; Valenza, 1996.). Ainsi les seules voies importantes de perte d'azote dans une culture de riz irriguée restent la volatilisation de l'ammoniac et la dénitrification.

Depuis les travaux de (Ponamperuma, 1972), les mécanismes influençant les propriétés chimiques de sols sous l'influence de la submersion sont bien connus. Le développement de conditions anoxiques favorise l'apparition de processus de réduction et la production d'alcalinité dans la solution du sol. L'augmentation de la pression partielle en CO_2 favorise conjointement une diminution du pH. Le second mécanisme est prépondérant sur la régulation du pH des sols alcalins. Ces mécanismes ont été observés et décrits sur les sols alcalins de l'Office du Niger (Marlet & N'diaye, 2002; N'diaye *et al.*, 2002). Les processus impliqués dans la dynamique de l'azote sont étroitement liés aux évolutions du pH et du potentiel d'oxydoréduction.

La surface du sol est le lieu principal de l'hydrolyse **de l'urée** en cas d'apport d'engrais. Elle est catalysée par un enzyme, l'uréase, abondante dans les sols.

L'hydrolyse complète est généralement obtenue 2 à 4 jours après l'application, et peut varier de 3 heures à une semaine en fonction des conditions expérimentales. Cette hydrolyse s'accompagne d'une augmentation du pH en relation avec une production d'alcalinité carbonatée et une consommation de CO_2 dans la solution. L'activité de l'enzyme dépend de la température et du pH dont les valeurs se situent entre 6 et 8. La production d'uréase est fonction de l'activité microbienne, et donc des conditions édaphiques, de la température et des conditions de pH et d'oxydoréduction du milieu (Savant *et al.*, 1985; Marcel, 1997). L'effet de l'anoxie liée à la saturation des sols submergés est diversement analysé selon les auteurs. D'après (Savant *et al.*, 1985) la vitesse de la réaction d'hydrolyse est fortement ralentie en condition anaérobie. La production d'ammonium est essentielle dans l'alimentation du riz irrigué, même si le riz peut également prélever le nitrate (Narteh & Sahrawat, 1999).

La **volatilisation d'ammoniac** se produit essentiellement pendant la première semaine suivant l'apport d'urée, le flux maximal étant généralement observé entre le second et le quatrième jour. En conditions naturelles, la quantité moyenne d'azote volatilisée après un apport d'urée pourrait varier de 0 à 50% avec une valeur moyenne de l'ordre de 20%. D'après (Narteh & Sahrawat, 2000) la volatilisation concerne 25 à 33% du N appliqué mais peut atteindre 75% du N total 11 jours après un apport d'urée. La volatilisation s'observe en priorité sur les sols alcalins et une augmentation du pH conduit toujours à accroître les pertes gazeuses (Rao & Batra, 1983; Marcel, 1997). Selon (Mikkelsen *et al.*, 1978) la volatilisation de l'ammoniac à travers la lame d'eau peut être influencée par l'activité photosynthétique des algues qui consomment du gaz carbonique pendant la journée et provoquent une augmentation du pH de la lame d'eau. L'impact des algues est surtout important en début de cycle quand la plante n'est pas encore bien développée et tend à disparaître dès que la culture développe un feuillage ne permettant plus de laisser passer suffisamment de rayons solaires pour la photosynthèse.

La **nitrification** provoque l'oxydation de l'ammonium en nitrate (ou en nitrite) dans la couche superficielle du sol, sous l'action de la microflore en conditions aérobies (Inko *et al.*, 1998). L'azote peut ensuite être perdu par **dénitrification** qui est la transformation bactérienne des nitrates (ou nitrites) en oxyde d'azote ou azote moléculaire gazeux en condition anoxique. Les facteurs dominants qui

régulent ces mécanismes sont la concentration en oxygène dissout, la disponibilité en nitrates et en source d'énergie pour les micro-organismes hétérotrophes. Les pertes sont supérieures dans des conditions d'alternance assèchement - réhumectation du sol et lorsque la CEC du sol est faible. Les pertes par dénitrification directement à travers le plant de riz, ont été mises en évidence par (Inko *et al.*, 1998), mais d'après (Fillery & DeDatta, 1986) ces pertes sont faibles après un apport d'urée (entre 5 et 11%). Cela serait dû au fait que la flore nitrifiante est inhibée par les fortes concentrations d'ammonium, que le riz consomme rapidement l'ammonium et que la lixiviation du nitrate n'intervient que lorsqu'il existe un drainage important (Dobermann & Witt, 1999), ce qui est rare en rizière.

Pour une utilisation plus efficace de l'urée, il est préférable d'apporter l'azote dans des conditions réductrices. En condition oxydée, l'azote se retrouve sous forme de nitrate très mobile qui se dénitrifie facilement. L'urée doit idéalement être placée dans la zone réduite si les conditions techniques le permettent. Dans la pratique, il est recommandé d'apporter l'urée sur le sol après vidange de la lame d'eau de façon à favoriser son adsorption sur le complexe d'échange, puis de renouveler la lame d'eau quelques jours plus tard afin de limiter les pertes par nitrification et dénitrification (Yoshida, 1981). A l'Office du Niger, l'urée est systématiquement apportée dans la lame d'eau par les paysans comme nous l'avons confirmé lors du diagnostic agronomique (chapitre 2).

En conclusion, la submersion engendre des transformations chimiques et biologiques dans le système sol- riz-lame d'eau à travers différents flux qui ont lieu pendant le cycle de croissance de la culture. La prise en compte de ces processus est importante car elle permet d'une part d'assurer une gestion efficace des apports d'azote afin d'assurer leur rentabilité économique par une meilleure alimentation du riz et d'autre part d'éviter des problèmes de pollution de l'environnement par l'effet de serre ou d'accumulation de nitrate dans les eaux souterraines.

1.2.2 Utilisation de l'azote par la plante et impact des pratiques culturales

1.2.2.1 Le prélèvement d'azote par le riz

L'alimentation azotée est une composante majeure dans la productivité de la riziculture irriguée car elle affecte toutes les phases dont dépend le rendement du riz. La déficience en azote est généralement considérée comme la principale cause des baisses de rendement (Narteh & Sahrawat, 1997; Cassman *et al.*, 1998; Fageria & Baligar, 2001). Le déficit d'azote entraîne la réduction du nombre de talles, réduisant ainsi le nombre de panicules et de grains. Ces composantes expliquent une grande partie de la variabilité du rendement.

Plusieurs causes peuvent être à la base d'un déficit en azote sur le riz.

- la faible fertilité du sol provoquant une faible fourniture en azote minéral,
- l'insuffisance et la faible efficience des apports d'azote sous forme d'engrais,
- la submersion permanente liée à la succession de plusieurs cultures par an,
- les périodes d'assèchement prolongées pendant la croissance du riz.

La production d'ammonium est essentielle dans l'alimentation minérale du riz irrigué en relation avec son adaptation aux sols submergés (Narteh & Sahrawat, 1999). En effet les faibles valeurs de potentiel d'oxydoréduction (Eh) s'opposent à la nitrification de l'azote ammoniacal qui est prédominant (Ponamperuma, 1972). Bien que la plante de riz soit aussi bien capable d'absorber et d'utiliser le nitrate que l'ammonium (Tanaka *et al.*, 1959), en condition de submersion, l'ammonium reste la principale forme disponible donc la plus absorbée (Tadano & Yoshida, 1978). Selon ces auteurs cette absorption dépend du stade de la culture et des quantités d'azote présentes dans le sol. Pendant les stades juvéniles et à 200 mg/kg de sol, l'ammonium est la forme la plus importante pour la croissance, mais après l'initiation paniculaire (IP) et à 100 mg/kg de sol, le nitrate peut être important. A 20 mg/kg les deux sources sont d'importance égale. En absorbant de l'ammonium, la plante libère des ions H^+ dans le milieu contribuant ainsi à diminuer le pH (Puard *et al.*, 1989).

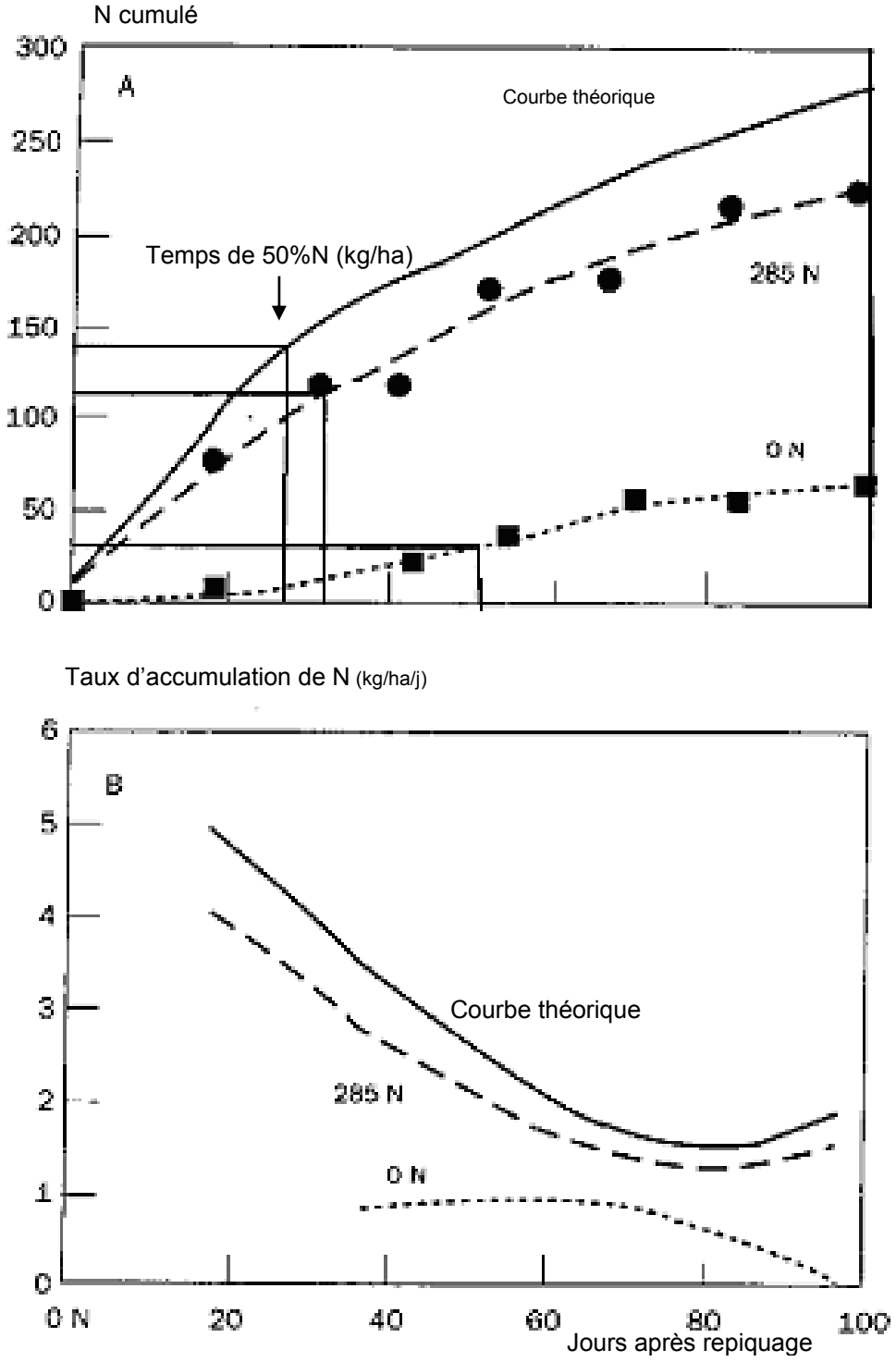


Figure 1.6 : prélèvement d'azote par la plante en conditions tropicales.

(A) Exportation cumulée d'azote. (B) taux d'accumulation journalière d'azote. (Source Kirk et Kronzuncker, 1999)

Par ailleurs le niveau d'alimentation azotée de la plante dépend de l'adéquation entre l'évolution des besoins en azote de la plante au cours du cycle (liés à la vitesse de croissance) et la disponibilité en azote dans le sol (résultant du bilan des différents flux présentés dans les paragraphes précédents). (Kirk & Kronzucker, 2000) montrent que le riz absorbe 50% de son azote entre 35 et 45 jours après repiquage (figure 1.6a) c'est à dire pendant la période où sa vitesse de croissance potentielle est maximale. On peut observer que cette période inclut l'Initiation Paniculaire (IP) qui détermine le nombre de panicules et d'épillets (figure 2.7 Chapitre2).

Pour cette raison on définit des stades clés auxquels les engrais azotés doivent être apportés. Selon (Yoshida, 1981) la formation de la jeune panicule et celle du nombre des épillets qui sont définis entre l'IP et le début montaison (c'est-à-dire entre la formation de la jeune panicule et le moment où elle mesure environ 1 cm) sont sous le contrôle de la nutrition azotée.

Le rendement croit généralement avec la dose d'azote apporté (figure 1.4), mais au-delà d'un seuil, la production n'est plus rentable. (Singh *et al.*, 1998) proposent 150 kgN/ha tandis que (Fageria & Baligar, 2001) situent ce seuil à 120 kg d'azote/ha pour les sols du Brésil. Pour ces derniers auteurs la production totale de matière sèche, le prélèvement de l'azote et son efficience sont significativement affectés par le mode de fractionnement. A l'Office du Niger les recommandations dépendent de la saison. Il est préconisé 120 kgN/ha en hivernage et 150 kgN/ha en saison sèche (Coulibaly, 2002).

1.2.2.2 Les indicateurs d'efficacité de l'apport d'azote

La première approche consiste à évaluer directement si les plantes sont en situation de carence en azote ou pas. Pour toutes les plantes il existe une teneur en azote critique, qui dépend de la biomasse aérienne et qui représente *la teneur minimum en azote dont une plante a besoin pour assurer une croissance maximum* (Lemaire & Gastal, 1998). De cette teneur critique, on déduit un indice de nutrition azotée (INN) pour rendre compte de l'état nutritionnel de la plante. Il est exprimé par le rapport entre la teneur (mesurée) de la plante en azote et la teneur critique (calculée à partir de la biomasse

aérienne). Cet indice doit être compris entre 0,8 et 1 pour permettre à la plante d'assurer sa croissance potentielle.

La deuxième approche, complémentaire de la première, se base sur des indicateurs globaux de l'efficacité de l'apport d'azote. Meynard et al (1997) ont utilisé le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU), qui correspond à la quantité d'azote absorbé issue des engrais par rapport à la quantité d'azote apportée, ainsi que l'efficience agronomique qui correspond à l'augmentation de rendement due à un apport d'azote (kg grain/kgN) et le taux de recouvrement de l'azote qui correspond au ratio entre l'azote prélevé par la plante et l'azote apporté (Dobermann & Witt, 1999; Wopereis *et al.*, 1999; Haefele *et al.*, 2003). En milieu paysan, ces deux paramètres sont considérés comme étant très faibles. A l'Office du Niger, le taux de recouvrement de l'azote varie de 20 à 80% (Wopereis *et al.*, 1999). (Dobermann & Witt, 1999) rapportent des résultats similaires avec une moyenne inférieure à 30% pour l'Asie tandis que l'efficience agronomique ne dépasse guère 10 kg grain/kgN.

La diffusion de l'ammonium dans la solution du sol est un bon indicateur pour estimer la contribution du sol dans l'alimentation du riz. (Narteh & Sahrawat, 2000) ont étudié le statut azoté de 15 sols différents de l'Afrique de l'Ouest. D'après cette étude, le statut azoté des sols est très variable (0.3 à 7.4 mgN/Kg de sol), la teneur en ammonium est en relation avec les teneurs en carbone organique et en azote et à l'exception de quelques sols pauvres en azote, le statut ammoniacal obéit à une relation exponentielle en fonction du temps.

1.2.3 Influence des pratiques des agriculteurs sur l'alimentation du riz

L'évolution des besoins en azote de la plante au cours du cycle et la disponibilité en azote dans le sol dépendent non seulement de la fertilité intrinsèque du sol, mais également des techniques employées.

Le riz est capable d'absorber de grandes quantités d'azote à partir de la lame d'eau à condition que l'apport coïncide avec les besoins de la plante (Narteh & Sahrawat, 2000). (Peng & Cassman, 1998) ont mesuré des prélèvements proches de 10 kg de N/jour/ha après un apport d'urée dans l'eau à l'IP. L'apport d'azote en dehors de ces stades clés contribue fortement aux pertes par volatilisation ou par immobilisation par des micro-organismes. Les méthodes d'apport sont également citées comme pouvant influencer l'efficacité

des engrais. Il est recommandé d'apporter l'azote dans un sol en boue et d'effectuer une irrigation 2 à 3 jours plus tard. Cela permettrait un meilleur enfouissement de l'azote dans le sol et d'éviter ainsi sa volatilisation sous forme d'ammoniac au niveau de la lame d'eau. Cependant dans le cas de l'Office du Niger, les engrais sont apportés dans une lame d'eau. Dans cette étude nous tentons de comprendre les implications de cette pratique des agriculteurs sur l'efficacité des engrais azotés et l'élaboration du rendement du riz.

En conclusion, l'efficacité de la nutrition azotée dépend moins de la nature et de la quantité des engrais apportés, que de l'adéquation entre les besoins de la plante (en relation avec des stades clés) et la disponibilité de l'azote dans le milieu. Elle dépend ainsi non seulement des transformations biologiques et chimiques, mais également et surtout de la gestion des apports tant par leur date que par leur adéquation avec la gestion de la lame d'eau pour minimiser les pertes.

1.3 Conclusion : problématique et démarche de la thèse

1.3.1 Problématique

L'aridité du climat, l'augmentation du niveau de la nappe et la qualité des eaux du fleuve Niger utilisées pour l'irrigation, ont contribué à faire évoluer les sols de l'Office du Niger vers des voies alcalines. Même si les mécanismes de la dégradation sont maintenant bien connus (Marlet & N'diaye, 1998; Dicko, 1999; Condom, 2000) l'ampleur de ce phénomène est diversement appréciée par les acteurs et son impact sur la production reste très discuté.

Depuis le début de la réhabilitation ayant permis un meilleur contrôle de lame d'eau sur la plupart des parcelles, les rendements n'ont cessé d'augmenter et se situent autour de 6 t/ha (figure 1.3). Cela a été possible grâce à la mise en place d'un contexte favorable aux plans technique (réhabilitation) et économique (dévaluation, libéralisation de la filière), l'amélioration des modalités de gestion des systèmes de riziculture irriguée (généralisation du repiquage et de la fertilisation organo-minérale, variétés plus performantes, …). Néanmoins, les rendements et l'efficacité des apports d'azote restent très variables et les rendements moyens plafonnent à des valeurs sensiblement inférieures au potentiel de production.

Les causes de cette variabilité apparaissent intimement liées à trois facteurs et leurs interactions : l'alcalinisation des sols, la gestion de la lame d'eau et la gestion technique des apports d'azote. Localement les valeurs élevées du pH *in situ* ont un effet défavorable sur la disponibilité des éléments minéraux. L'alimentation minérale des cultures en phosphore et zinc, mais aussi en azote serait affectée (Marlet *et al*, 1998). Si la disponibilité en phosphore et zinc est liée à la solubilité des constituants minéraux dans cet environnement chimique, celle de l'azote est influencée par la vitesse de minéralisation de la matière organique, l'hydrolyse de l'urée, et l'augmentation du risque de perte sous forme gazeuse (volatilisation d'ammoniac) qui s'ajoute à celle sous forme soluble (lixiviation dans des cas rares et écoulement vers le système de drainage). Dans les sols submergés, les principaux mécanismes qui influencent l'évolution du pH *in situ* (Ponamperuma, 1972) peuvent également influencer la

dynamique de l'azote à travers les différents flux qui en résultent et sa disponibilité pour le riz.

L'augmentation des rendements s'est accompagnée de l'augmentation des doses d'engrais utilisés. L'azote occupe une part importante des éléments apportés. Cela avait d'ailleurs fait l'objet de recommandation dès les premières études pédologiques dans la zone (Dabin, 1951; Bouyer & Dabin, 1963). Cependant une analyse des apports d'azote depuis le début de la réhabilitation du réseau montre que leur efficience est faible et ne dépasse pas 30 %, voire tend à baisser depuis plusieurs années. Cela est confirmé par (Wopereis *et al.*, 1999) qui ont montré l'importance de la variabilité de l'efficience de l'azote et ses liens avec les pratiques qui ne tiennent pas toujours compte de l'adéquation entre les besoins de la plante et la disponibilité d'azote. La nutrition azotée apparaît ainsi comme un déterminant essentiel de la production rizicole.

L'objectif de ce travail est d'analyser les interactions entre les propriétés physico-chimiques du sol *in situ* et les modalités d'application des techniques culturales telles que la fertilisation azotée, le repiquage et la gestion de l'eau, et leur influence sur l'alimentation azotée, la croissance et le rendement du riz. L'objectif finalisé est d'identifier les pratiques culturales sur lesquelles agir pour améliorer l'efficience des apports d'azote et le rendement dans le contexte de l'Office du Niger.

1.3.2 Approche adoptée

La démarche combine un diagnostic agronomique pour identifier les combinaisons des facteurs précédents que l'on rencontre dans les parcelles des agriculteurs puis une analyse expérimentale en conditions contrôlées et au champ pour analyser l'influence des principaux facteurs identifiés.

Sur le terrain nous avons successivement travaillé en milieu paysan et en station. Un diagnostic agronomique a d'abord été réalisé auprès de dix paysans installés sur des situations pédo-hydrauliques contrastées en analysant les pratiques chez chaque paysan et leur impact sur l'élaboration du rendement du riz et le fonctionnement global du système sol-riz-lame d'eau (chapitre 2).

Deux expérimentations ont été mises en place au laboratoire afin d'analyser l'effet de certains facteurs (lame d'eau et apport d'urée) sur la dynamique de l'azote sur sols alcalins et non alcalins en fonction de l'environnement chimique

déterminé par le pH *in situ* du sol et de la lame d'eau. Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'hydrolyse de l'urée et aux pertes d'azote ammoniacal (chapitre 3). Les pertes par dénitrification ont été estimées par l'étude du bilan des formes d'azote minéral en réacteur fermé.

Ces facteurs (type de sol, gestion de la lame d'eau et de l'apport d'azote), ainsi que certaines pratiques identifiées lors du diagnostic (date de repiquage et statut azoté des plants au repiquage) ont ensuite été testés en combinaison dans les conditions du champ pour reproduire des situations types identifiées au cours du diagnostic agronomique (chapitre 4).

Ces différents résultats sont ensuite repris pour dégager des pistes de gestion intégrée de la lame d'eau, des apports d'azote et des itinéraires techniques du riz afin d'améliorer simultanément les rendements et l'efficacité de la fertilisation azotée (chapitre 5).

Chapitre 2 : Analyse du fonctionnement du système Sol–eau-riz dans les parcelles des agriculteurs de l'Office du Niger.

Chapitre 2 : Analyse du fonctionnement du système Sol–eau-riz dans les parcelles des agriculteurs de l'Office du Niger.

2.1 Introduction

A l'Office du Niger les rendements s'échelonnent entre 2 et 7 t/ha, mais ils sont toujours inférieurs au potentiel (10t/ha) des variétés cultivées dans cette zone. La riziculture y est pratiquée par submersion des sols. Dans ce type de milieu, l'efficience des apports d'azote est faible (Dobermann & Witt, 1999; Wopereis *et al.*, 1999). L'azote apparaît ainsi comme un facteur primordial en riziculture irriguée (Cassman *et al.*, 1998) et l'amélioration de son efficience un enjeu important pour accompagner l'amélioration des performances et la marge brute de la riziculture, d'autant plus que le coût des engrais est très élevé.

La dynamique et l'efficience de l'azote dans le système sol-riz-lame d'eau sont principalement influencées par les pratiques des agriculteurs et les variables d'état du milieu.

- L'inadéquation entre le calendrier de fertilisation azotée et les besoins du riz. Il existe des phases clés pendant lesquelles le riz absorbe l'essentielle de ses besoins en azote (Kirk & Kronzucker, 2000). L'apport d'azote en dehors de ces phases est susceptible d'entraîner des pertes d'azote pour la plante et peut donc avoir un impact sur son efficience.
- Les méthodes d'apport d'azote préconisées consistent à placer l'azote au plus près des racines de la plante par enfouissement de l'engrais. Dans les parcelles des agriculteurs ne disposant pas de technologies adéquates, l'engrais est apporté par épandage en surface et le plus souvent dans une lame d'eau. Cette pratique peut avoir des conséquences sur l'efficience d'azote en occasionnant des émissions gazeuses à partir de la lame d'eau (Freney *et al.*, 1885).
- Le pH, en plus de son impact sur la disponibilité du zinc, du fer ou du phosphore (Yoshida, 1981) peut influencer également la dynamique de l'azote et accentuer les pertes invoquées par (Freney *et al.*, 1885). En effet, selon (Rao & Batra, 1983; Fillery & DeDatta, 1986; Van Diest, 1988; Singandhupe & Rajput, 1989; Inko *et al.*, 1998; Narteh & Sahrawat, 2000; Zhu *et al.*, 2003) dans la lame d'eau, la consommation de gaz carbonique

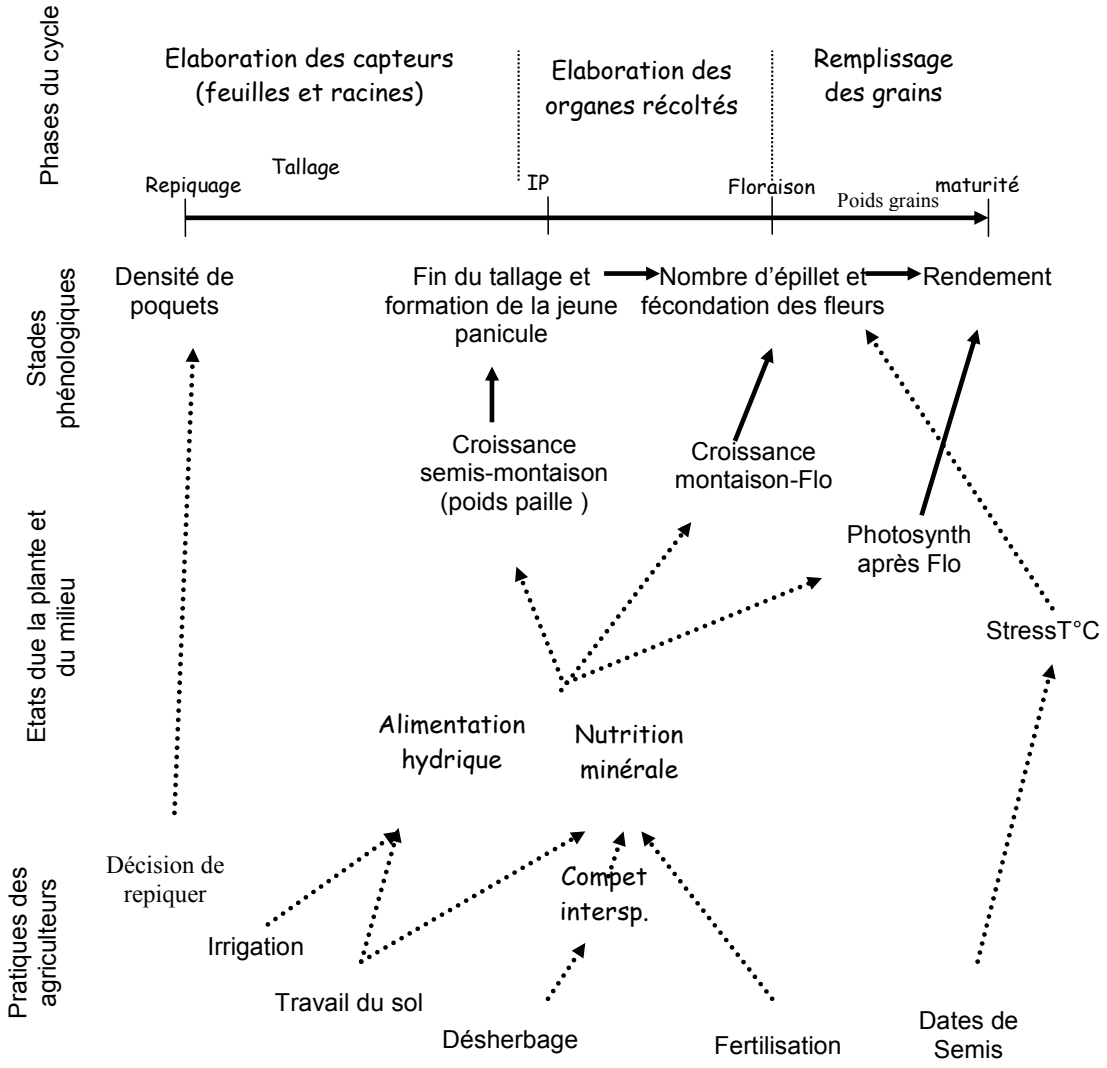


Figure 2.7 : Schéma d'élaboration du rendement.

(Impact des conditions du milieu et des pratiques)

Les flèches pleines représentent les influences à l'intérieur du peuplement végétal ; les flèches discontinues représentent l'influence des pratiques du milieu

entraîne l'augmentation du pH et si pendant ce temps la pNH_3 est élevée, la volatilisation d'ammoniac est très importante Selon Rao et Batra (1983), en milieu alcalin, la volatilisation d'ammoniac est contrôlée par le couple pH/alcalinité

A l'Office du Niger, la pratique paysanne consiste justement à apporter l'azote et les autres nutriments dans une lame d'eau et après le repiquage du riz. Si la présence d'une lame d'eau permet de diminuer les effets du pH et d'empêcher les pertes liées au processus de nitrificati-dénitrification, son maintien au moment des apports reste discutable compte de l'existence des possibilités de pertes invoquées plus haut.

L'objectif de ce travail est d'évaluer la variabilité des rendements et des pratiques en champ paysan afin de comprendre son fonctionnement et les causes de la faible efficience des apports d'azote. Nous utiliserons pour cela la méthode du diagnostic agronomique (Dore *et al.*, 1997; Affholder & Scolpel, 2001). Cette méthode se fonde sur l'analyse de l'élaboration du rendement qui est conditionnée par les états du milieu, les pratiques culturales et leurs interactions. Ces conditions de milieu et de pratiques peuvent influencer *a priori* tous les flux d'azote dans le système sol-riz-lame d'eau en jouant soit sur la disponibilité en azote pour la plante, les pertes dans l'environnement et les besoins en azote de la plante ou sa capacité à le prélever. Ces différents éléments sont résumés dans la (figure 2.7). De ce schéma il apparaît que les pratiques ont un impact sur l'ensemble des phases du cycle, soit directement par la mise en place de la culture (semis et repiquage) soit indirectement en jouant sur l'état du milieu ou du peuplement végétal. Ainsi, la date du semis peut avoir pour conséquence la mauvaise germination pour les semis de périodes froides et peut induire la stérilité des fleurs quand la floraison coïncide avec des périodes froides ou chaudes (Dingkuhn et al, 1995). De même, la qualité du travail du sol peu avoir un impact sur la nutrition minérale et hydrique du riz car, un champ mal plané laisse des parties hautes difficilement irrigable avec les conséquences que cela implique dans un contexte de sol alcalin. L'impact d'une fertilisation mal conduite est bien connu et diminue fortement l'efficacité des apports d'azote, mais la fertilisation elle-même peut être affectée par des états du milieu défavorable comme le niveau du pH et de la

température. Ces hypothèses sont étudiées pour permettre de comprendre le fonctionnement du système.

2.2 Matériel et méthodes

2.2.1 Dispositif et choix des sites

Les sites sont choisis en cohérence avec le dispositif de l'Institut d'Economie Rurale (IER) pour le suivi et l'amélioration des performances de la riziculture à l'Office du Niger dans le cadre du Pôle Systèmes Irrigués (PSI). Le dispositif s'appuie sur le suivi de 20 parcelles, chez 10 paysans (notés A à J), à raison de 2 parcelles (notées 1 et 2) par paysan. Le choix des sites tient compte de deux critères : l'un d'ordre pédologique et l'autre d'ordre hydraulique.

2.2.1.1 Critère pédologique

Les sols de l'Office du Niger regroupent deux grand groupes sur la base de leur texture (Dabin, 1951; Keita *et al.*, 1991) : les sols de type *« danga », sablo-limoneux, et les sols de type « moursi », argileux.* Ces sols sont sujet à la dégradation de leurs propriétés par l'alcalinisation et la sodisation. D'après (Marlet & N'diaye, 2002) la situation a connu une évolution différente avant et après la réhabilitation. Son impact est globalement limité dans les conditions actuelles de la riziculture, mais des risques importants existent en faveur de l'aggravation de la situation en l'absence d'une adaptation des pratiques à un environnement qui se modifie. Ainsi avons-nous distingué quatre types de situation : les sols argileux ou non, mais alcalins et les sols argileux ou non, mais non alcalins**.**

2.2.1.2 Critère hydraulique

La position du site par rapport au réseau hydraulique pourra faciliter les pratiques d'irrigation ou de drainage. Les parcelles situées en amont du réseau sont *a priori* plus "faciles" à irriguer et à drainer (évacuation de la lame d'eau) à l'exception de certains points hauts où la maîtrise de l'eau est difficile. A l'aval, la vidange des bassins rizicoles peut être perturbée par la saturation du réseau de drainage suite aux fortes pluies ou lors des périodes de fin de cycle.

Tableau 2.1 : répartition des parcelles en fonction des situations pédo-hydrauliques : choix *a priori*.

Sol		Hydraulique	
pH	Texture	Favorable	Défavorable
Non alcalin	Argileux	H1, H2, I1, I2	non disponible
	Non argileux	Inexistant	F1, F2, G1, G2, J1, J2
Alcalin	Argileux	D1, D2	A1, A2
	Non argileux	C1, C2, E1, E2	non disponible

Nous avons donc distingué deux situations au plan hydraulique : situation *a priori* favorable à une bonne gestion de l'eau, et situation *a priori* défavorable.
En croisant ces deux familles de critères, on obtient huit situations possibles (tableau 2.1). Nos parcelles sont réparties dans seulement cinq de ces situations. Les trois situations non représentées dans notre échantillon, sont soit rarement présentes dans la réalité (sol alcalin non argileux en position favorable) et nos observations n'ont pas permis de les rencontrer sur les sites où nous avons travaillé, soit existent réellement (sol non alcalin, argileux, position défavorable et sol alcalin, non argileux en position défavorable) mais les propriétaires de ce type de parcelle n'étaient pas disposés à collaborer.

2.2.2 Caractérisation du milieu

2.2.2.1 Gestion de l'eau

Le planage permet de maintenir une hauteur d'eau homogène sur toute la parcelle et d'économiser de l'eau devenue inutile pour la submersion des points hauts. Pour évaluer l'état du planage des parcelles, la topographie de chacune d'elle a été établie. Les relevées ont été réalisées avant le travail du sol selon un maillage de 5 mètres X 5 mètres.

2.2.2.2 Caractérisation physico-chimique des sols

Cinq échantillons de sol ont été prélevés à cinq endroits (aux quatre angles et au milieu) sur chaque parcelle et à deux profondeurs (0-10 cm et 10-30 cm). Les analyses ont été effectuées sur un échantillon composite obtenu à partir des cinq prélèvements par le laboratoire d'analyses du CIRAD à Montpellier.
Le pH eau et la conductibilité électrique sont mesurés dans une suspension sol/ solution de 1/2,5 à l'aide d'une électrode de verre combinée et d'un conductimètre à lecture directe, respectivement. La granulométrie est déterminée par tamisage et sédimentation (méthode à la pipette). L'azote total et le carbone total sont déterminés par chromatographie gazeuse. Le phosphore assimilable est dosé par la méthode Olsen-Dabin. La composition du complexe d'échange est analysée après extraction par la méthode au chlorure de cobaltihexamine (Orsini & Remy, 1976). Elle consiste à saturer

l'échantillon de sol par du cobaltihexamine en excès. La CEC est déterminée par différence entre la quantité apportée et celle restée en solution. Les bases échangeables sont analysées dans la solution extraite.

2.2.3 Matériel végétal

Tous les paysans ont utilisé la variété *Kogoni 91-1*. Cette variété est la plus répandue dans la zone d'étude, a une durée de cycle moyenne (130 à 145 jours) et est non photosensible. Son rendement potentiel est proche de 10t/ha. Elle est relativement peu sensible à la panachure jaune du riz, une virose qui occasionne des pertes importantes dans la zone de l'Office (Coulibaly, 2002). Cette variété possède des caractéristiques proches de BG90-2 qui a servi au paramétrage du modèle RIDEV (Dingkuhn *et al.*, 1995). Nous utilisons donc ce modèle pour simuler le développement du riz dans chacune des parcelles suivies en utilisant les paramètres de la variété BG90-2. Cette simulation nous permet de reconstituer le développement du riz, de déterminer ainsi pour chaque parcelle suivie les stades clés du riz et de comparer ensuite les pratiques observées au calendrier cultural optimum proposé par le modèle RIDEV. Elle nous permet également de déceler d'éventuelles stérilités liées à la température.

2.2.4 Mesures et observations sur le système biophysique

Quatre placettes de 1 m de diamètre ont été installées dans chaque parcelle pour le suivi des variables du sol (pH, azote minéral). L'emplacement des placettes de suivi a été choisi avant le labour en fonction de la topographie du terrain à raison de 2 placettes en position moyenne, 1 en position basse et 1 en position haute. Malheureusement, la topographie ayant été modifiée par le labour, la distinction d'altitude entre les 4 placettes n'a plus été possible.

2.2.4.1 Mesures sur le sol et la lame d'eau

Quatre prélèvements de sol ont été faits à la reprise, à l'initiation paniculaire (IP), à début épiaison et à la floraison, à la profondeur de 30cm pour la mesure du pH *in situ,* et pour l'extraction de l'azote minéral dans une solution molaire de KCl. Le mélange sol/solution KCl a été agité pendant deux heures, puis le surnageant a été prélevé et filtré à 0,2 µm. Le dosage de l'azote minéral (nitrate et ammonium) a été fait par colorimétrie automatique.

2.2.4.2 Suivi de la culture

En faisant l'hypothèse que le statut azoté des jeunes plants peut jouer un rôle dans la vitesse de croissance et le prélèvement de l'azote après le repiquage, ce statut a été déterminé **au repiquage** sur 4 échantillons de 10 plants prêts à être repiqués. La mesure a été effectuée à l'aide du chlorophylle-mètre Minolta SPAD-502. Cet appareil permet de mesurer une teneur en chlorophylle de la feuille dont on peut déduire une teneur en azote par unité de surface foliaire et a l'avantage de donner une mesure dans un bref délais et dans les conditions non destructives (Peng *et al.*, 1993; Cartelat *et al.*, 2004).

De la reprise à la floraison l'une des 2 placettes initialement en « position moyenne » a fait l'objet de mesures et d'observations à la reprise, à l'IP, au début épiaison et à la floraison. Les dates d'observation des différents stades ont été notées pour situer les pratiques en fonction de ces stades. Les observations effectuées concernent l'état de la parcelle en matière d'enherbement, de maladies ou d'attaques d'insecte, et de l'état de la lame d'eau (présence d'une lame d'eau et sa hauteur dans le cas échéant, assèchement...).

A la récolte les composantes de rendements ont été mesurées dans les 4 placettes. Les nombres de poquets, de tiges et de panicules dans chaque placette ont été déterminés sur la totalité des plants de la placette. Après séparation de la panicule du reste de la plante et égrainage, les échantillons ont été séchés à l'étuve à 65°C pendant trois jours. Les poids secs des rachis, feuilles, tiges, grains pleins et grains vides ont été déterminés ainsi que le poids de 1000 grains pleins, et de 1000 grains vides. Les nombres de grains (pleins et vides) ont été calculés à partir du poids de 1000 grains. Le nombre d'épillets correspond à la somme des grains pleins et des grains vides. Le taux de fertilité apparent des épillets correspond au rapport entre le nombre de grains pleins et le nombre d'épillets.

2.2.4.3 Données météorologiques

La pluviométrie journalière et les températures journalières minimales et maximales à 2 m sous abris sont les seules données disponibles à la station météorologique du Sahel qui fait partie de la zone d'étude. Ces données ont été recueillies.

2.2.4.4 Caractérisation des pratiques culturales

Les pratiques ont été enregistrées au cours d'entretiens avec les paysans en cours de culture et après la récolte. Les informations sur les dates et modalités de labour, repiquage, désherbage, fertilisation, récolte et les types et doses d'engrais utilisés ont été recueillies.

2.2.5 Méthodes d'analyse des résultats

La caractérisation du milieu nous a permis d'analyser la variabilité du pH et de la CEC et de la qualité de la gestion de l'eau. Ces variables ont été utilisées dans le cadre d'une analyse en composantes principales (ACP) en introduisant le rendement en variable supplémentaire et d'affiner la typologie des situations pédo-hydrauliques établie *a priori* lors du choix des parcelles. Dans un deuxième temps, nous avons analysé les effets de chaque situation sur les relations entre le nombre de poquets et le nombre de panicules d'une part, et entre le nombre de panicule et le poids de rachis d'autre part. La première relation reflète les conditions de croissance du riz durant la phase végétative (du repiquage à l'IP) ; la seconde reflète les conditions de croissance durant la phase reproductive (de l'IP à la maturité). Dans un troisième temps, nous avons analysé, dans chaque situation, l'effet des pratiques (repiquage et gestion des apports d'azote) sur le rendement. Enfin nous avons analysé la dynamique du pH et de l'azote dans chaque situation pédo-hydraulique en fonction des pratiques de gestion de l'eau et de fertilisation.

2.3 Résultats et discussions

Sur les 20 parcelles étudiées, 2 parcelles ont été récoltées par les paysans avant nos prélèvements pour les mesures de composantes de rendement. Les résultats porteront donc sur 18 parcelles, soit 72 placettes. Dans la suite du document nous utiliserons les placettes pour analyser l'état du milieu et du peuplement végétal et des parcelles pour l'analyse des pratiques.

2.3.1 Caractérisation des situations pédo-hydrauliques

Les résultats détaillés des analyses de sol sont donnés au tableau A.13 (annexe).

2.3.1.1 Texture

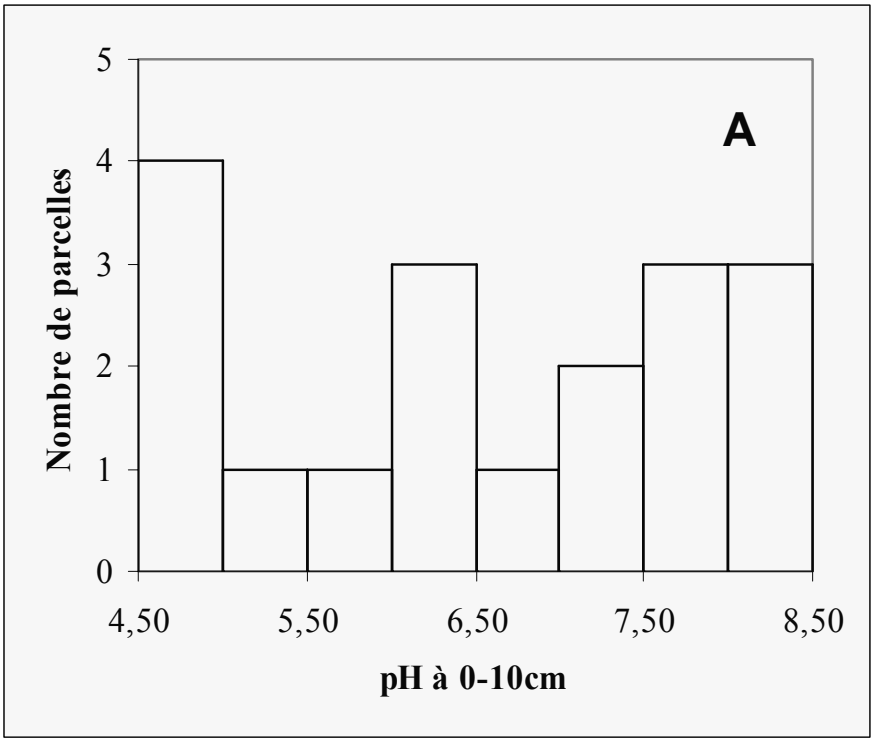
Les parcelles se repartissent en 4 situations texturales : limono-argileux (LA), limon argilo-sableux (LAS), sableux (LS et SL) et argileux (A). Les parcelles sur sols Danga ont une texture LA, LAS ou LS-SL. Les parcelles sur sol Moursi ont toutes une texture A avec plus de 45% d'argile.

2.3.1.2 Caractéristiques chimiques

En surface (0 à 10 cm) le pH est élevé (> 7,5) dans 7 parcelles sur les 20 étudiées. Les sols plus sableux sont plutôt acides. Par contre, dans la couche 10-30 cm le pH est élevé (pH > 7,5) pour tous les sols. Cet horizon est légèrement plus argileux que l'horizon de surface pour l'ensemble des parcelles sauf sur les parcelles H et I.

Le taux de sodium échangeable est en général inférieur à 7 sauf sur les parcelles (E1 et E2) où l'on a observé des salants noirs en surface.

La teneur en matière organique est inférieure à 2% voire inférieur à 1% dans certaines parcelles avec un ration C/N supérieur à 9. La capacité d'échange cationique est variable de 2 à plus de 25 méq/100g. La teneur en phosphore assimilable est d'au moins 7ppm et se trouve en position échangeable comme le calcium et le magnésium.



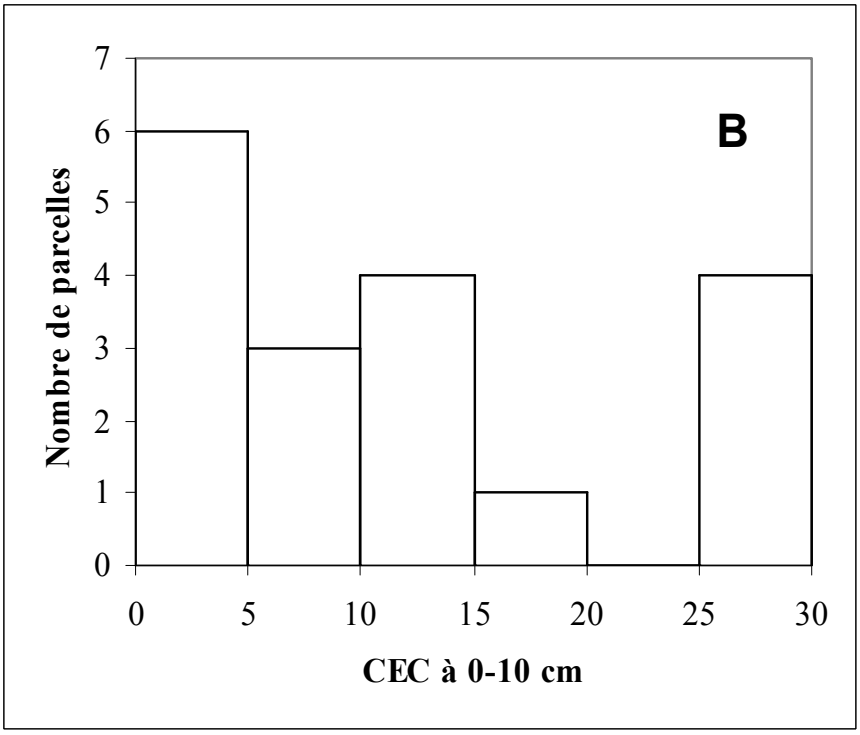


Figure 2.8 : variabilité du pH (A) et de la CEC (B) des parcelles dans l'horizon 0-10cm. Analyses effectuées au laboratoire sur un échantillon composite obtenu à partir de cinq échantillons

On est ainsi en face de situation avec des niveaux de dégradation différents. D'après Keïta (1996) avec le niveau du ESP (7%) le processus de dégradation des sols est amorcé dès que ESP atteint 7% pour l'ensemble des sites Les sols sont pauvres en matière organique qui est en même temps peu minéralisée (C/N supérieur à 9 ; (Baize, 1998). Cela est probablement en relation avec l'état d'hydromorphie des sols dû à l'irrigation et à la présence d'une nappe affleurante. Peu de sols (1/3) sont en déficience de phosphore assimilable (inférieur à 7 ppm d'après (Dobermann & Fairhust, 2000),

Ces propriétés physico-chimiques des sols permettent de les caractériser à partir du pH et de la CEC, en se basant sur l'horizon 0-10 cm (figure 2.8).

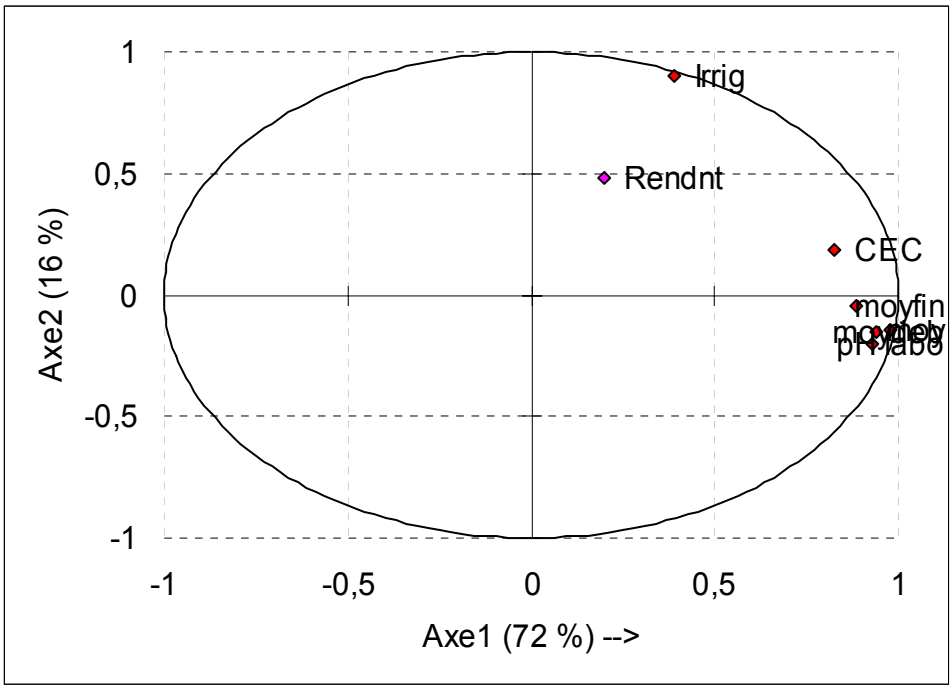


Figure 2.9 : Projection des variables sur le plan 1x2.

Le pH labo (pHlabo) et les moyennes des pH au début (moydeb) et à la fin du cycle (moyfin) sont représentés sur l'axe 1 (72%) mieux que CEC sur le même axe. La qualité de l'irrigation (Irrig) et le rendement (rdt) introduit en variable supplémentaire sont représentés sur l'axe 2 (16%)

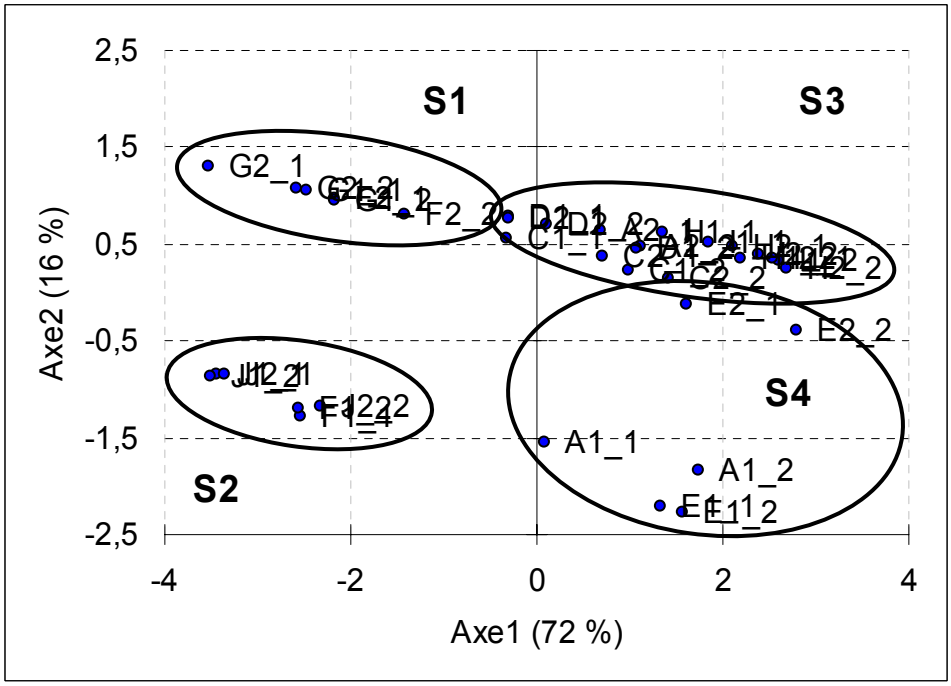


Figure 2.10 : Projection des parcelles sur le plan 1X2

Quatre groupes ressortent et seront notés par la suite S1, S2, S3, et S4.

2.3.1.3 Nouvelle typologie des parcelles

Après la caractérisation des parcelles un nouveau regroupement des parcelles a été réalisé en prenant en compte les états du sol (CEC et pH au début et en fin de cycle).

Nous avons réalisé une ACP avec ces variables en introduisant le rendement comme variable supplémentaire pour vérifier les groupes pédohydrauliques.

Les résultats de l'ACP sont donnés sur la figure 2.9. Les caractéristiques de sol sont toutes bien corrélées et représentées sur l'axe 1 (72% de la variabilité), tandis que la gestion de l'eau est représentée sur l'axe 2 (16% de la variabilité). Le rendement apparaît davantage corrélé à l'axe 2. Ce qui suggère que le pH explique peu le rendement mais apparaît comme un facteur déterminant de la nutrition minérale du riz.

La projection des parcelles sur le plan est illustrée par la figure 2.10. Les parcelles sont reparties en quatre groupes représentant des situations pédo-hydrauliques différenciées (tableau 2.2). Si les groupes S1 et S2 sont bien différenciés, on peut remarquer par contre que certaines parcelles des groupes S3 et S4 sont assez proches. Nous maintenons néanmoins ces parcelles dans leurs groupes respectifs tout en considérant qu'elles peuvent changer de groupe avec l'amélioration ou la dégradation du mode de gestion de l'eau.

Tableau 2.2 : nouvelle typologie basée sur l'analyse en composantes principales.

Les groupes sont repartis en S1, S2, S3, S4 (S pour situation pédo-hydraulique). Les cases vides correspondent à des combinaisons inexistantes dans notre échantillon.

Sol	Hydraulique	
pH	Favorable	Défavorable
Non alcalin	F2, G1, G2 (S1)	F1, J1, J2 (S2)
Modérément Alcalin	A2, C1, C2, D1, D2, H1, H2, I1, I2 (S3)	
Alcalin		A1, E1, E2 (S4)

Avec ces variables nous couvrons les effets éventuels des caractéristiques chimiques et hydrologiques sur l'ensemble des phases du cycle. Le pH donne des indications sur l'état de dégradation de la parcelle et la disponibilité éventuelle des éléments nutritifs (Yoshida, 1981). Son impact sur le rendement est fonction du stade de croissance du riz. Ainsi, le pH en début de cycle influence probablement la reprise et la capacité de tallage, tandis que le pH en fin de cycle peut contrôler la nutrition azotée à partir de l'initiation paniculaire. Quant à la CEC, c'est un bon indicateur de fertilité du sol. En effet, la CEC traduit la capacité de rétention des éléments nutritifs qui pourront ensuite être disponibles par échange, ce qui en fait une source potentielle de nutriments comme NH_4^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} et K^+. Elle est en relation avec la teneur en argile du sol et avec le type d'argile, mais reste constante à l'intérieur du même type d'argile (Baize, 1998). L'effet du pH peut être atténué ou aggravé par la qualité de la gestion de l'eau. Nous analysons donc la variabilité du rendement en tenant compte de ces facteurs.

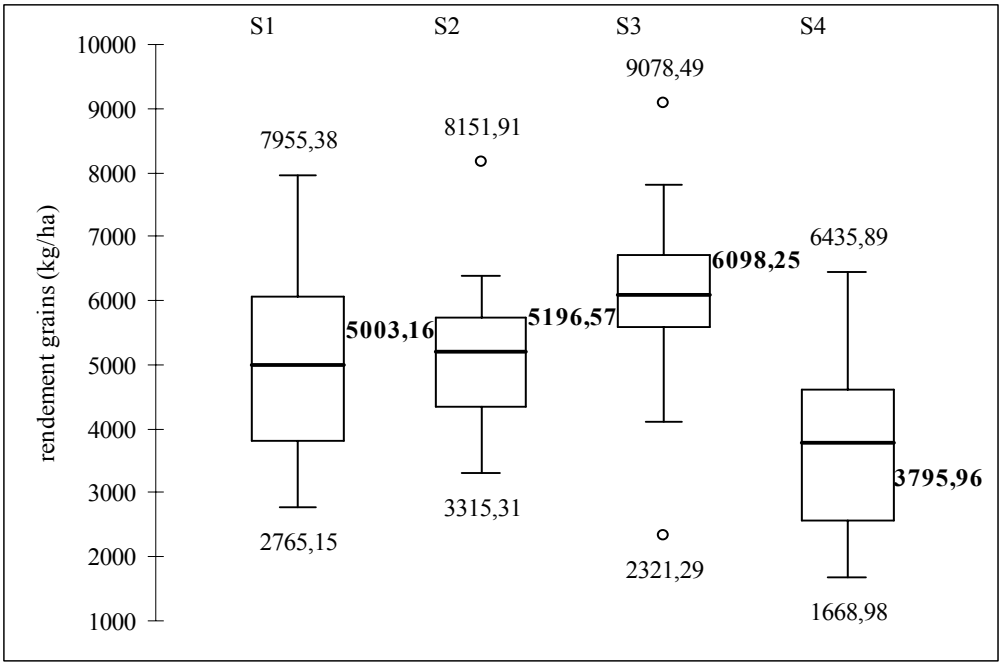


Figure 2.11 : variabilité du rendement au sein des groupes de parcelles.

Les groupes S1, S2, S3, S4 sont identifiés au tableau 2.2 ; les valeurs en gras représentent la moyenne.

Tableau 2.3 : comparaison de la moyenne des rendements dans les différents groupes tableau (2.2).

A = bonne gestion de l'eau ; B = mauvaise gestion de l'eau.

Groupes	Parcelles	(gestion de l'eau)	Rdt (kg/ha)	Ecart-type	Moyenne Groupe (kg/ha)	Ecart-type groupe
S1	F2	A	6592	537	5003	1387
S1	G1	A	4556	1402		
S1	G2	A	5277	2397		
S2	F1	B	4693	867	5197	1345
S2	J1	B	4486	1155		
S2	J2	B	6234	1454		
S3	A2	A	6459	1154	6098	1146
S3	C1	A	5827	594		
S3	C2	A	5752	1171		
S3	D1	A	6592	537		
S3	D2	A	5840	132		
S3	H1	A	6661	903		
S3	H2	A	6079	1182		
S3	I1	B	6064	949		
S3	I2	B	5217	2080		
S4	A1	B	2442	593	3796	1416
S4	E1	B	4756	1518		
S4	E2	B	4321	356		

2.3.2 Analyse de la variabilité du rendement et de ses composantes.

2.3.2.1 Répartition des rendements selon le type de situation

Le tableau 2.3 et la figure 2.11 donnent la répartition des rendements et leur variabilité par type de situation identifiée.

Le groupe S3 a le rendement le plus faible, les autres groupes ont des rendements moyens de 5 à 6 t/ha.

Les rendements sont cependant très variables (figure 2.11) puisqu'ils s'échelonnent entre 1669 (S4) et des valeurs proches du potentiel de la variété utilisée, 9078 kg/ha (S3). Cette variabilité s'observe au sein de la même parcelle (tableau 2.3).

2.3.2.2 Variabilité des composantes du rendement

Les résultats de la statistique descriptive sont donnés au tableau 2.4. Il ressort de l'analyse de ce tableau que le coefficient de variation pour chaque variable est relativement élevé.

Tableau 2. 4 : Description du rendement et de ses composantes

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	CV
Nombre de poquets (/m^2)	9	32	19	0,27
Nombre de tiges (/m^2)	152	484	300	0,22
Nombre de tiges/poquet	8	32	17	0,30
Nombre de panicules (/m^2)	136	416	273	0,21
Epillets/panicule	55	243	104	0,25
Poids paille (kg/ha)	1288	6900	4077	0,30
Poids Rachis (kg/ha)	112	339	232	0,21
Poids de 1000 grains (g)	18	24	22	0,06
Nombre d'épillets (/m^2)	12881	46655	27862	0,23
Rendement (kg/ha)	1669	9078	5392	0,28

Le poids de 1000 grains est la variable la plus homogène entre les parcelles. Cette composante dépend du poids maximum du grain, qui est une caractéristique variétale liée à la taille de l'enveloppe, et des conditions de

remplissage des épillets (Yoshida, 1981). Le poids de 1000 grains n'est pas significativement corrélé au rendement.

En dehors du rendement, la densité d'implantation, le tallage et le poids paille sont les plus variables. La densité d'implantation varie de 9 à 32 poquets/m2 avec une moyenne de 19 poquets/m^2. Cela pourrait suggérer que la variabilité du rendement soit en partie influencée par les différentes phases du développement végétatif de la culture pendant la première phase du cycle car le nombre de poquets est mis en place au repiquage (figure 2.7). Sa variabilité est liée à la densité de repiquage qui exprime la décision de l'agriculteur. Mais dans les conditions de l'office du Niger, la qualité du repiquage peut aussi être influencée par le système de rémunération du travail salarié sur la base de l'unité de surface repiquée. On peut également faire l'hypothèse que le stress causé par le repiquage affectant le tallage, l'agriculteur peut réagir en mettant une densité plus importante. La même décision peut être motivée avec les plants jeunes qui réagiraient moins bien à des conditions de milieu défavorable, un sol alcalin par exemple. Le tallage, c'est-à-dire le nombre de tiges par poquet (CV 0,30), peut être déterminé par les conditions édaphiques, par le nombre de plants repiqués si une densité trop élevée pénalise le développement des talles produits, ou par la diminution du potentiel de tallage pour les plants repiqués trop âgés. On n'observe aucune différence significative du nombre de tiges entre les parcelles repiquées avec des plants jeunes, moyens ou âgés alors que le nombre de poquets est significativement plus élevé avec les plants jeunes. Dans le même temps, la densité d'implantation (poquets/m^2) n'a pas d'impact appréciable sur le nombre de tiges par poquet dans les parcelles où le repiquage a été tardif ou très tardif (figure. 2.14). Ainsi peut-on admettre que les agriculteurs n'appréhendent pas l'effet défavorable du repiquage de plants théoriquement trop âgés. *A contrario*, la densité de repiquage est plutôt accrue dans le cas du repiquage de plants jeunes et supposerait l'existence d'un mécanisme susceptible d'affecter leur développement dans la mesure où le nombre de tiges n'est pas conjointement augmenté. Nous retiendrons paradoxalement que ce sont les sols les moins alcalins dont le tallage semble le plus affecté (figure 2.12).

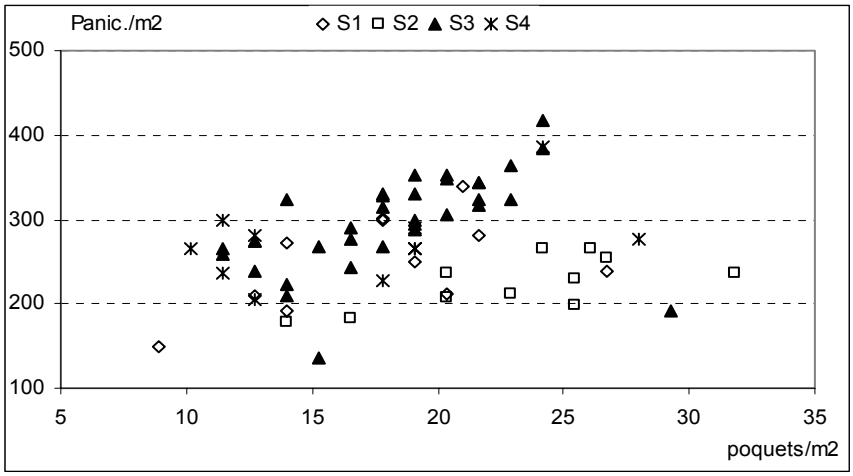


Figure 2.12 : évolution du nombre de panicules en fonction de la densité d'implantation.

Pour les figures 2.6, 2.7 les points représentent les placettes dans les groupes pédo-hydrauliques (tableau II.2).

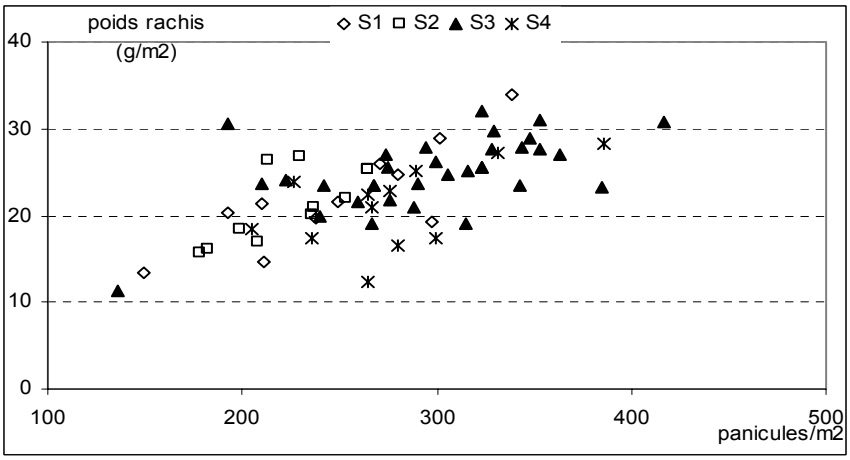


Figure 2.13 : influence de la densité de panicules sur le poids rachis dans les groupes.

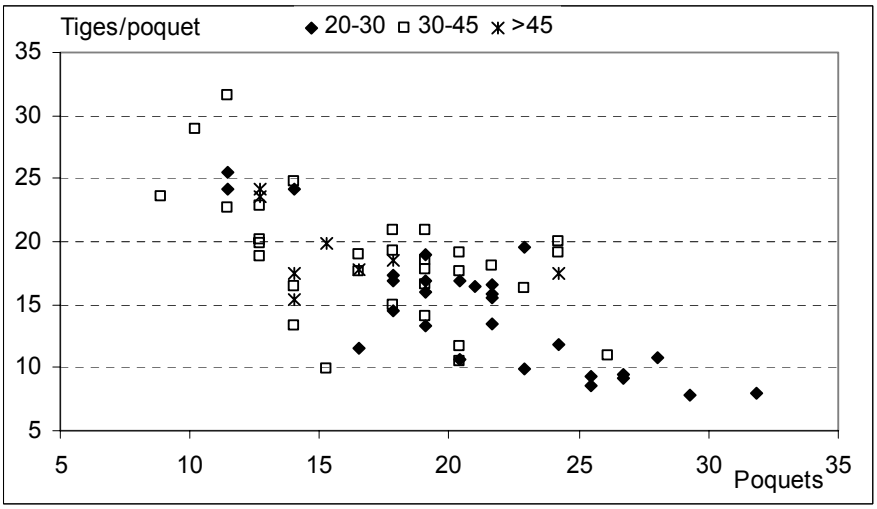


Figure 2.14 : influence de la densité de repiquage sur l'évolution du nombre de tiges par poquets.

Mesures effectuées dans les trois groupes d'âge de plants au moment du repiquage (20-30 jours, 30-45 jours, plus de 45 jours). Les points représentent les placettes.

2.3.3 Influence des situations pédo-hydrauliques sur l'élaboration du rendement

Pour expliquer l'impact des situations pédo-hydrauliques (tableau 2.2) sur l'élaboration du rendement, nous nous intéressons aux relations entre le nombre de panicules et le nombre de poquets (figure 2.12) et entre le poids de rachis et le nombre de panicules (figure 2.13). La première relation est liée aux conditions de croissance jusqu'à l'Initiation Paniculaire (IP), et la seconde aux conditions de croissance entre l'IP et la floraison.

A deux exceptions près, les placettes du groupe 3 (S3) ont le nombre de panicules le plus élevé (figure2.12). Pour les autres groupes, le nombre de panicules par placette dépasse rarement 300 et il est le plus souvent inférieur au nombre de panicules obtenu avec le même nombre de poquets sur les placettes du groupe S3.

On observe un regroupement des placettes en fonction du nombre de panicules à l'exception de quelques placettes du groupe S4 (figure. 2.13). Les placettes du groupe 4 (sols alcalins et mauvaise gestion de l'eau) ont cependant souvent un poids de rachis plus faible (pour un nombre de panicules données).

Il apparaît ainsi que la bonne gestion de la lame d'eau semble atténuer l'effet néfaste du pH sur le groupe S3 pour lequel on enregistre les meilleures conditions pour l'élaboration d'un rendement élevé qui est soutenu par une CEC élevée. Pour les groupes S1 et S2 le principal facteur limitant pourrait être la faible CEC, entraînant des carences préjudiciables au tallage alors que le facteur déterminant serait le pH accentué par une mauvaise gestion de la lame d'eau pour S4.

Cependant toutes les parcelles du groupe S3 n'ont pas des rendements aussi bons comme l'on pourrait s'y attendre. Certaines ont même un rendement faible (2321kg/ha). Ainsi, même si les conditions pédo-hydrauliques ont un effet important sur l'élaboration du rendement, les 4 situations identifiées ne suffisent pas à expliquer les différences de rendement. Nous allons maintenant analyser l'influence des pratiques sur l'élaboration du rendement au sein de chaque groupe pédo-hydraulique.

Les 4 situations semblent avoir moins d'influence sur l'élaboration du rendement après l'IP

2.3.4 Influence des pratiques sur l'élaboration du rendement

Pour cette analyse nous nous intéresserons à la gestion de la lame d'eau, à l'âge des plants au repiquage, aux dates et modalités d'apports de l'azote, et aux quantités d'azote et de phosphore apportées avec les engrais. Les pratiques ont été caractérisées par comparaison aux recommandations. Les histogrammes de certaines pratiques (repiquage, dates d'apport des engrais, quantités d'azote et de phosphore apportés à l'hectare et date de récolte) sont présentés en annexe (figure A.83, annexe). Par ailleurs les dates optimales des différentes opérations ont été déterminées pour chaque parcelle à l'aide du modèle RIDEV (tableau A.14 ; Annexe).

2.3.4.1 Age et statut azoté des plants au repiquage

Statut azoté des plants au repiquage

Nous avons utilisé comme indicateur du statut azoté des plants au repiquage, les valeurs mesurées à l'aide du chlorophylle-mètre (SPAD). Peng et al (1996) fixent le seuil à partir duquel il faut apporter de l'azote à une valeur SPAD de 35 indépendamment de la variété. Dans les parcelles où sont installées les placettes, les valeurs SPAD sont toutes inférieures ou égales à 32, indépendamment de l'âge des plants. Nous avons donc arbitrairement reparti les parcelles en deux groupes : celles qui ont des valeurs supérieures à 28 (assez bon statut azoté) et celles qui ont des valeurs inférieures à 28 (faible statut azoté).

Figure 2.15 : Classification des parcelles selon l'âge et le statut azoté des plants au moment du repiquage.

A = plants jeunes, bon statut azoté ; B = plants jeunes, mauvais statut azoté ; C = âge moyen, mauvais statut azoté; D = plants âgés, bon statut azoté.

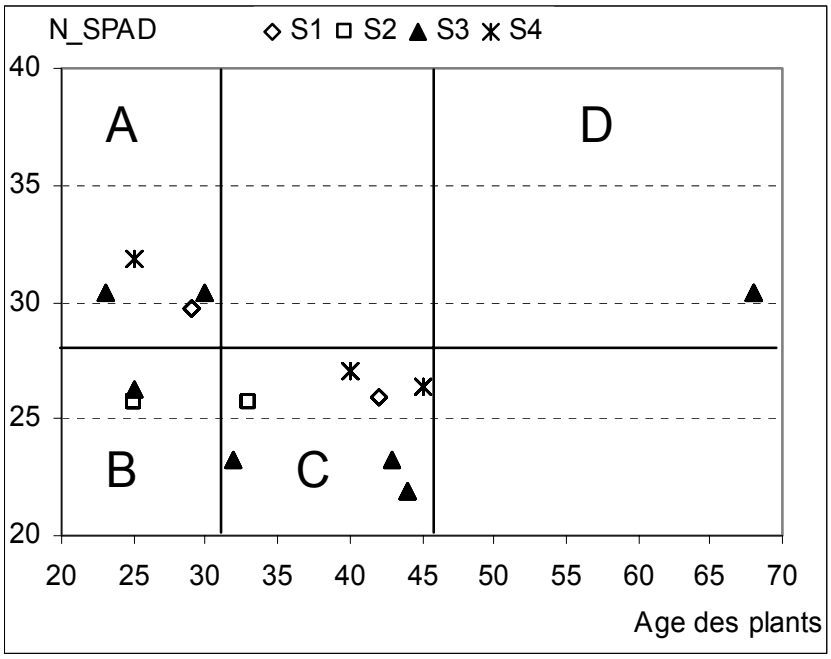


Tableau 2.5 : Influence du statut azoté et de l'age des plants au repiquage sur le nombre de tiges.

La valeur entre parenthèses représente l'écart-type. Avec les valeurs en gras pour les groupes identifiés d'après la figure II.10 : A = plants jeunes, bon statut azoté ; B = plants jeunes, mauvais statut azoté ; C = âge moyen, mauvais statut azoté; D = plants âgés, bon statut azoté. Jas = jours après semis.

Age des plants au repiquage	STATUT AZOTE	
	Bon	Mauvais
Plants jeunes (20 – 30 jas)	(**A**) C1, C2, E2, G1, G2	(**B**)A2, J1, J2
	309 (52)	260 (54)
Age moyen >30 et < 45 jas	AUCUNE PARCELLE	(**C**) A1, E1, F1, F2, H1, H2, I1, I2
		308 (78)
Plants âgés > 45 jas	(**D**) D1, D2	AUCUNE PARCELLE
	302 (61)	

Age des plants au repiquage

L'âge des plants varie de 23 à 68 jours. Nous avons réparti les parcelles en trois groupes selon l'âge des plants au repiquage : plants entre 20 et 30 jours inclus, ceux jusqu'à 45 jours le dernier groupe constitué de plant de plus de 45 jours.

En combinant les deux critères âge et statut azoté des plants au repiquage nous pouvons identifier 4 groupes de parcelles notées A à D en ne considérant que les combinaisons où nous avons des parcelles (figure 2.15).

Le nombre de tiges est significativement plus faible avec des plants jeunes à faible statut azoté (260 tiges/m2). La variabilité intra-parcellaire est faible sauf sur les plants d'âge moyen avec un faible statut azoté pour lesquels on enregistre l'écart- type le plus élevé (tableau 2.5).

L'âge des plants au repiquage et leur statut azoté pouvant influencer la capacité de tallage du riz, mais l'observation des parcelles ne montre de dufférence qu'en présence d'un faible statut azoté du riz au moment du repiquage.

Tableau 2.6 : Caractérisation des pratiques de fertilisation N et P

Le lien est fait avec le rendement dans les parcelles réparties dans les 4 situations pédo-hydrauliques définies au tableau 2.2

groupes	Parcel.	Repiq. (jas)	Dose P	Date P	Dose N1	Date N1	Dose N2	Date N2	Dose N3	Date N3	N-tot.	rendement	Ecart-type
recommandation		21-30	20	reprise	60	reprise	60	IP					
S1	F2	42	20	56	41	56	69	98	23	108	133	4616	123
	G1	29	30	38	27	38	69	47	46	60	142	4556	1402
	G2	29	30	38	27	38	69	47	46	60	142	5277	2397
S2	F1	33	30	41	27	41	46	57	46	81	119	4693	867
	J1	25	30	34	27	34	46	50	46	81	119	4486	1155
	J2	25	30	34	27	34	46	50	46	81	119	6234	1454
S3	A2	25	20	42	41	42	69	73	23	84	133	6459	1154
	C1	23	20	28	18	28	92	58			110	5827	594
	C2	30	20	38	18	38	92	58			110	5752	1171
	D1	68	20	77	64	77	35	108			99	6592	537
	D2	68	20	77	64	77	34	108			99	5840	132
	H1	32	20	53	64	53	92	73			156	6661	903
	H2	43	20	53	64	53	92	73			156	6079	1182
	I1	44	40	51	36	51	92	69	46	99	174	6064	949
	I2	44	40	51	36	51	92	69	46	99	174	5217	2080
S4	A1	40	16	47	14	47	46	62			60	2442	593
	E1	45	20	59	18	59	46	79			64	4756	1518
	E2	25	20	36	41	36	69	74	23	94	133	4321	356

Repiq = repiquage
IP = initiation paniculaire (75jas)
jas = jours après semis
P = phosphore ; Nx = fractions d'azote
Les doses d'azote et le rendement sont donnés en kg/ha
Les dates d'apport sont données en jours après semis.

2.3.4.2 Gestion des apports d'azote et de phosphore

Le tableau 2.6 récapitule la gestion du calendrier cultural pour le repiquage et les apports d'azote et de phosphore.

Tous les paysans suivis ont apporté du phosphore et de l'azote sur leurs parcelles. Les apports d'azote sont variables entre 60 et plus de 170 kg/ha. Les dates d'apport sont également variables et l'azote est apporté dans une lame d'eau.. Le phosphore est aussi apporté en quantités variables (entre 20 et 40 kg/ha), mais en une seule fois et proche de la reprise conformément aux recommandations.

La gestion des apports d'azote est variable en terme de date et de dose apportée. Sur certaines parcelles du groupe S4 (parcelle A1), un seul apport d'urée a été effectué. Cet apport est non seulement insuffisant (60 kg/ha d'urée amenant 27,6 kg N/ha), mais également effectué de façon trop précoce par rapport à l'initiation paniculaire. Les parcelles D1 et D2 (groupe S3) ont reçu des plants « trop âgés » mais l'azote a été apporté à une date proche de l'initiation paniculaire (77 jours après semis) à début montaison, puis une quantité réduite a été apportée plus tard. Ainsi avec des plants âgés, une bonne gestion de la lame d'eau pourrait permettre l'obtention d'un rendement équivalent à ce qu'on obtient avec des plants plus jeunes, mais pour lesquels la gestion de l'azote a été moins efficace, car elle compense des conditions défavorables crées par le repiquage. Par contre, une mauvaise gestion de l'azote combinée à une mauvaise gestion de la lame d'eau conduit au faible rendement obtenu sur A1 (2442 kg/ha) alors que les autres parcelles du même groupe (E1 et E2) pour lesquels l'azote a été apporté à l'IP avec une meilleure gestion de la lame d'eau, ont obtenu des rendements plus élevés. Ainsi, il apparaît que, dans des conditions pédo-hydrauliques comparables, les pratiques sont aussi susceptibles d'affecter les performances de la riziculture.

Il apparaît ainsi que les situations pédo-hydrauliques seules ne suffisent pas à expliquer les différences de rendement entre parcelles. Les pratiques de repiquage et de fertilisation azotée peuvent compenser ou accentuer les effets de ces conditions. On peut identifier à partir de ces résultats des situations agronomiques particulières issues de la combinaison des facteurs pédo-

hydrauliques fondés sur l'état du milieu et la gestion de l'eau et des pratiques (gestion de la fertilisation et du repiquage) :

- A1 (groupe S4) avec le rendement le plus faible (2442 kg/ha ; tableau 2.5) se trouve en sol neutre à basique, mais le pH de l'horizon le plus profond (10-30cm) est alcalin (pH>8). La gestion de la lame d'eau a été mal réalisée avec des assecs très fréquents, de même que la fertilisation azotée avec un seul apport trop éloigné de l'initiation paniculaire. Dans ces conditions l'ammonium issu de l'hydrolyse de l'urée est rapidement nitrifié et pourrait être perdu par dénitrification. Cette situation est aggravée si l'apport d'azote ne coïncide pas avec les besoins de la plante. E1 et E2 (groupe S4) se trouvent également sur un sol très alcalin (pH proche de 9) et sableux. Ces facteurs sont favorables à des pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac et une maîtrise difficile de l'eau à cause de la nature sableuse du sol. Cependant, les apports d'azote sont plus proches des recommandations et le rendement est plus élevé que sur A1.
- Les parcelles D1 et D2 sont dans une situation pédo-hydraulique favorable mais se distinguent par l'utilisation de plants très âgés (68 jours) considérée comme défavorable au rendement. Cependant nous observons un rendement relativement bon même supérieur ou égal à d'autres parcelles où la pépinière était beaucoup plus jeune. Sur cette parcelle le paysan a apporté les engrais aussitôt après le repiquage. Ceci a pu permettre de compenser les effets défavorables d'un repiquage tardif.

Des investigations complémentaires s'imposent pour analyser ces situations complexes. Nous avons donc été amenés à mettre en place des expérimentations en milieu contrôlé au laboratoire et en station pour étudier : l'effet de la gestion de la lame d'eau sur la dynamique de l'azote dans un milieu dégradé, d'une part, et les facteurs biologiques qui peuvent influencer son efficience sous une culture de riz, d'autre part.

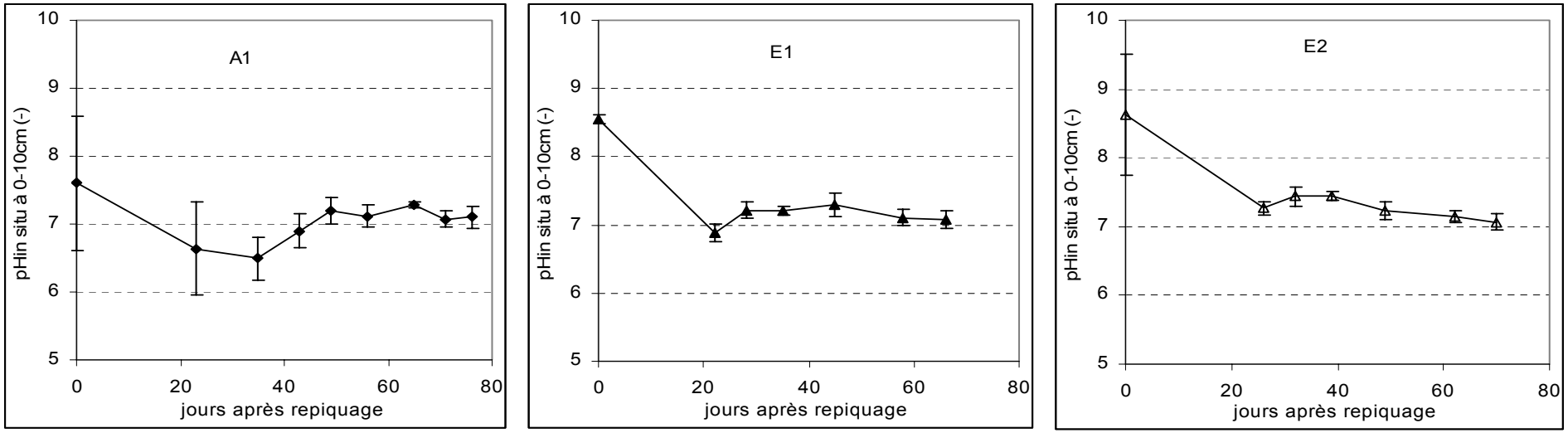


Figure 2.16 : évolution du pH *in situ* (0-10cm) dans les parcelles A1, E1, E2 (groupe S4).

Les résultats représentent la moyenne sur quatre échantillons. Les barres verticales représentent l'écart-type.

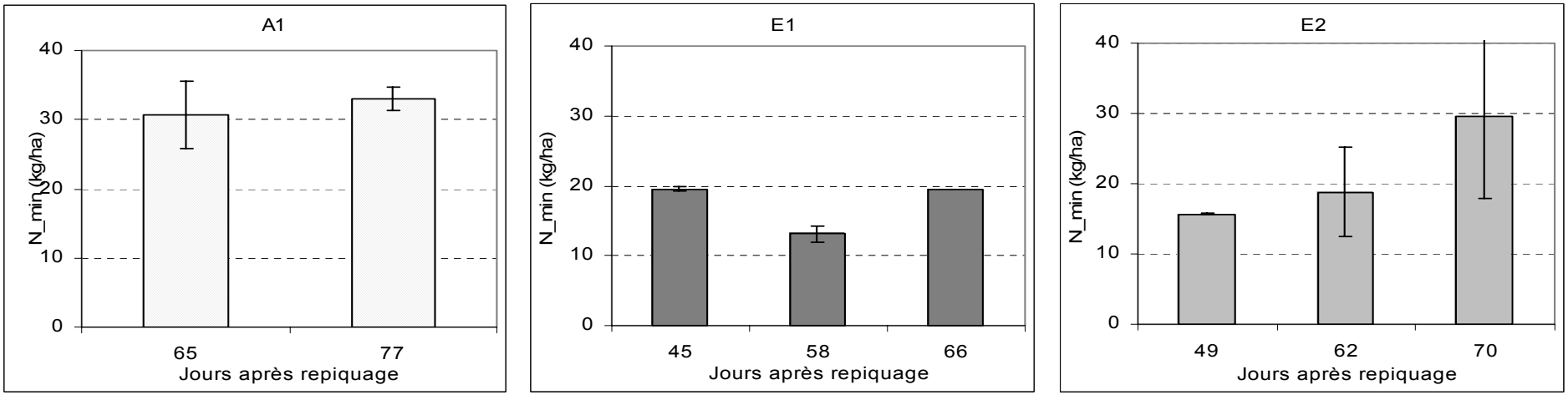


Figure 2.17 : évolution de l'azote minéral dans les parcelles A1, E1, et E2 (groupe S4).

Les résultats représentent la moyenne sur quatre échantillons. Les barres verticales représentent l'écart-type.

2.3.5 Influence des situations pédo-hydrauliques et des pratiques sur l'évolution du pH et de l'azote minéral du sol

Les évolutions du pH et de l'azote minéral au cours du cycle de la culture sont présentées pour les situations particulières identifiées. On s'intéresse à ces états du milieu afin de vérifier que leurs dynamiques sont cohérentes avec les situations pédo-hydrauliques et les pratiques et afin d'analyser si ces dynamiques peuvent expliquer le comportement des cultures.

Les parcelles A1, E1 et E2 ont des pH élevés en début de cycle avec des efflorescences noires en surface (figure 2.16). Le pH baisse ensuite de plus d'une unité puis remonte légèrement et reste stable autour de 7. Sur ces parcelles les quantités d'azote minéral mesurées ne dépassent pas 30 kg/ha en moyenne (figure 2.17). En outre les niveaux de N ne reflètent pas celui du pH. D'ailleurs sur E2 on observe une évolution opposée des deux variables. Lorsque le pH baisse sur E2 vers 70 jours après repiquage, les teneurs en azote minéral augmentent.

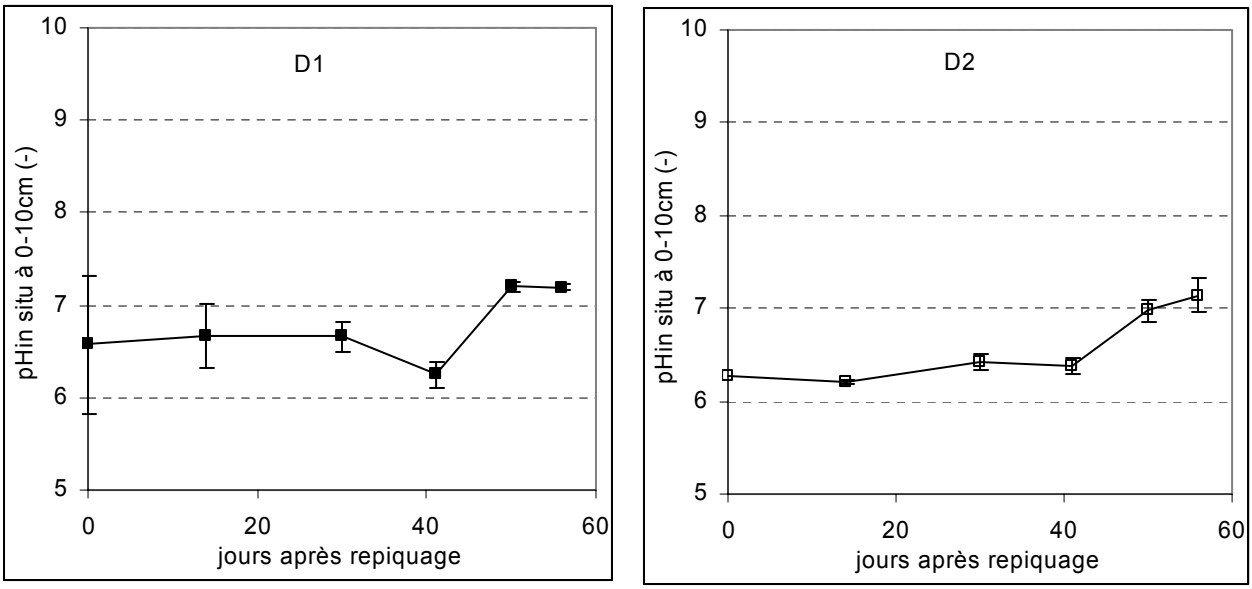


Figure 2.18 : évolution du pH *in situ* (0-10cm) dans les parcelles D1 et D2 (groupes S3).

Les résultats représentent la moyenne sur quatre échantillons. Les barres verticales représentent l'écart-type.

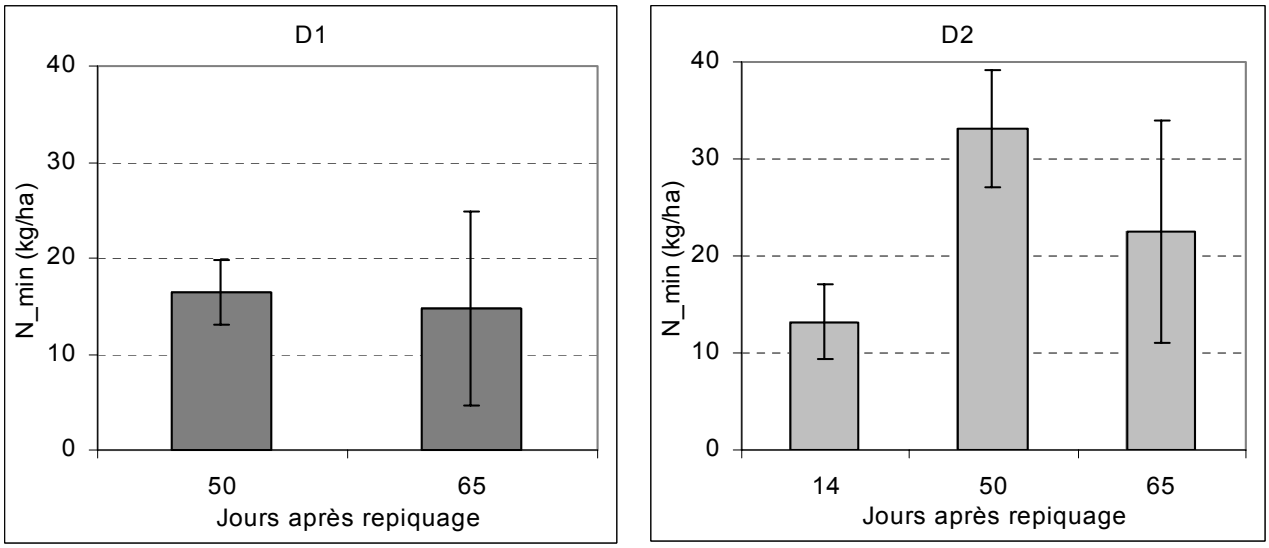


Figure 2.19 : évolution de l'azote minéral du sol (0-30cm) dans les parcelles D1, D2 du groupe S3.

Les moyennes sur quatre prélèvements sont présentées. Les barres verticales représentent l'écart-type

Sur les parcelles D1 et D2 (groupe S3) le pH modérément alcalin en début de cycle est stable puis augmente vers 7 à partir du jour 40. Sur ces parcelles également les quantités d'azote sont faibles et ne dépassent 40 kg/ha que sur D2 à 50 jours après repiquage. A la même date, on observe une augmentation du pH sans faire de lien entre les deux évolutions, car aucun apport d'azote n'a été effectué à cette date (figures 2.18 et 2.19).

L'évolution du pH est sous le contrôle de deux processus antagonistes. L'un concerne l'augmentation de la pression partielle de CO_2 qui fait baisser le pH et l'autre est en relation avec la réduction des oxydes et hydroxydes de fer qui produit de l'alcalinité avec comme conséquence l'augmentation du pH. Le premier phénomène est généralement dominant sur sols alcalins, et le second sur sols acides ; le pH a ainsi tendance à évoluer vers les valeurs neutres quelle que soit la valeur initiale (Ponamperuma, 1972). Le pH peut également augmenter sous l'influence de l'hydrolyse de l'urée qui produit des bicarbonates et consomme du gaz carbonique.

L'effet du pH est fonction du stade de croissance et de la qualité de la gestion de la lame d'eau. En cours de cycle son effet est susceptible de se manifester de différentes façons : perte d'azote par volatilisation de l'ammoniac à travers la lame d'eau et carence en certains éléments nutritifs. Ainsi, en début de cycle et en fonction de la gestion de l'eau, le pH peut affecter la croissance du riz et joue sur les phases ultérieures comme on peut le voir sur les groupes S1, S2 et S4 par rapport à S3 (figure 2.13). Ensuite, avec l'installation de la lame d'eau, le pH évolue vers la neutralité et ses effets sur la croissance du riz diminuent (figure 2.14).

L'hydrolyse de l'urée joue sur l'évolution du pH. Cependant cela n'apparaît pas clairement sur les mesures effectuées dans nos parcelles. L'observation des graphiques (figure 2.16 à 2.19) ne montre pas de concordance entre l'évolution du pH et celle de l'azote minéral. Pour certaines parcelles on note même des évolutions en sens opposés. Avec ces résultats nous ne pouvons pas conclure que les deux variables sont indépendantes car, les dates de mesures n'étaient pas caler par rapport à la gestion de la parcelle qui était à l'initiative du paysan.

2.4 Conclusion

Les rendements observés chez les paysans suivis sont très variables en relation avec la variabilité des composantes étudiées (figures 2.12 et 2.19). Le développement végétatif semble être influencé dès le début du cycle par les conditions pédo-hydrauliques défavorables en relation avec des pH élevés ou une faible CEC. Ces conditions ne semblent pas avoir d'effet important après l'initiation paniculaire. A partir de cette date, les pratiques jouent le rôle le plus important. Ces pratiques sont également variables même à l'intérieur du même groupe. Leur analyse révèle trois situations particulières (issues du tableau 2.3) qui se caractérisent par l'influence de la gestion de la lame d'eau et de l'azote d'une part (groupe S3) et d'autre part par la gestion du repiquage. Ces situations suggèrent que ni les conditions du milieu, ni les pratiques seules ne suffisent à expliquer la variabilité des rendements. Cela justifie le fait qu'un rendement faible soit obtenu sur la parcelle A1 tandis que les autres parcelles se trouvant dans la même situation pédo-hydraulique (S4) obtiennent des rendements plus élevés et que les parcelles D1 et D2 (S3) donnent des rendements moyens acceptables malgré l'utilisation de plants âgés.

Sur la base de ces situations agronomiques particulières, nous avons mis en place des expérimentations en station et en laboratoire en combinant l'effet du sol, de la gestion de l'eau et de la conduite de la culture sur la dynamique de l'azote, son prélèvement par la culture et l'élaboration du rendement.

Chapitre 3 : Etude au laboratoire de l'effet de la lame d'eau, du repiquage, des apports d'azote et de leurs interactions sur la dynamique l'azote.

Chapitre 3 : Etude au laboratoire de l'impact de la gestion de la lame d'eau, du repiquage, des apports d'azote et de leurs interactions sur la dynamique l'azote.

3.1 Introduction

Les résultats du diagnostic agronomique montrent une forte variabilité des rendements et des pratiques des agriculteurs. Ils démontrent notamment qu'un sol alcalin ou une gestion non optimale de l'eau sont préjudiciables au rendement. Cependant la complexité des interactions entre le sol et la gestion de l'eau d'une part et entre le sol et les autres pratiques d'autres parts, ne nous permet pas de conclure quant à la dynamique de l'azote et par conséquent son efficience après un apport d'engrais.

Dans ce chapitre, on étudiera *in vitro* les principaux mécanismes affectant la dynamique de l'azote dans les conditions spécifiques de la riziculture sur sols alcalins à l'Office du Niger.

Les différents processus impliqués dans le cycle de l'azote en riziculture irriguée par submersion ont été synthétisés par (Dobermann & Fairhust, 2000) et (Chowdary *et al.*, 2004) et impliquent quatre compartiments du système : la **lame d'eau** superficielle qui influence les flux d'espèces gazeuses entre l'atmosphère et la lame d'eau (Mikkelsen *et al.*, 1978) et constitue le lieu de l'hydrolyse de l'urée apportée en épandage ; la **mince couche superficielle** juste en dessous de la lame d'eau tout comme la rhizosphère, est le siège du processus de nitrification, mais selon (Chowdary *et al.*, 2004), la contribution de cette couche est négligeable à cause de sa taille (de l'ordre de 10 mm) ; l'**horizon réduit** correspond à la partie travaillée du sol favorable à la réduction de l'azote (dénitrification) et de métaux (Mn et Fe) et à la fourniture d'azote à la plante par la minéralisation des matières organiques. L'azote minéral, principalement sous forme de nitrate pourrait transiter vers les **horizons sous-jacents** par lixiviation qui peut être considérée comme négligeable dans les conditions de l'Office du Niger en présence d'une nappe sub-affleurante.

Dans les conditions d'études deux principales voies de pertes d'azote dans le système sont considérées : (i) par volatilisation de l'ammoniac à travers la lame d'eau ; (ii) par dénitrification. Ces deux processus peuvent être influencés par le

pH, les conditions d'oxydoréduction et la concentration en ammonium dans la lame d'eau en cas d'épandage en surface.

Deux expérimentations ont été menées, en réacteur fermé au laboratoire et en pot de culture sous serre, de façon à appréhender l'influence conjuguée du type de sol, d'un apport d'urée, de la présence d'une lame d'eau superficielle ou d'une culture de riz sur les propriétés du sol (pH, Eh) et la dynamique des formes d'azote minérales. Ces résultats ont été complétés par les données d'un suivi au champ réalisé par (Condom, 2000) en condition de riziculture irriguée sur sol alcalin à l'Office du Niger.

Tableau 3.7 : analyse physico-chimique des deux sols utilisés dans l'expérimentation

Caractéristiques		Sol n°1	Sol n°2
Granulom étrie	Argile (%)	24.70	64.70
	Limons fins (%)	8.70	10.30
	Limons grossiers (%)	14.70	9.50
	Sables fins (%)	28.70	10.90
	Sables grossiers (%)	23.10	4.50
pH eau (-)		8.75	7.85
pH KCl (-)		8.00	6.75
Matière organique (%)		0.76	2.18
Carbone organique (%)		0.44	1.26
Azote total (%)		0.30	1.01
C/N (-)		14.70	12.54
Phosphore assimilable Olsen-Dabin (ppm)		9.35	27.90
Composition du complexe d'échange cationique : Méthode du Chlorure de cobaltihexamine	Calcium (meq/100g)	4.72	16.84
	Magnésium (meq/100g)	3.94	5.72
	Potassium (meq/100g)	1.09	0.43
	Sodium (meq/100g)	0.25	1.18
	Aluminium (meq/100g)	0	0
	Manganèse (meq/100g)	0.001	0.008
	H (meq/100g)	3.81E-06	0.00
	Somme (meq/100g)	9.98	24.18
	CEC (meq/100g)	12.012	27.487
	Saturation (%)	0.83	0.88
Composition de la solution du sol (extrait 1/5)	pH (-)	8.64	7.34
	Calcium (meq/l)	0.28	0.33
	Magnésium (meq/l)	0.34	0.14
	Potassium (meq/l)	0.35	0.04
	Sodium (meq/l)	0.20	0.56
	Chlorure (meq/l)	0.03	0.05
	Sulfate (meq/l)	0.06	0.04
	Nitrates (meq/l)	0.005	0.04
	Carbonates (meq/l)	1.09	0.97
	Cond. électrique (µS/cm)	211	198

3.2 Matériels et méthodes

3.2.1 Le sol

Deux types de sol dont : un alcalin (Sol 1) correspondant au groupe S4 des situations pédo-hydrauliques (chapitre 2), et l'autre modérément alcalins (Sol 2) correspondant au groupe S3 des mêmes situations, ont été prélevés à Niono en zone Office du Niger dans le cadre de cette étude. Les échantillons de sol utilisés au laboratoire ont été prélevés entre 0 et 15 cm, correspondant à l'horizon réduit et travaillé lors de la mise en boue des rizières. Les résultats des analyses sont présentés dans le tableau 3.7.

Le sol 1 est situé sur une levée de texture sablo-limoneuse. Il a été longtemps abandonné par l'Office du Niger à cause des problèmes d'infertilité liés à l'alcalinisation et a été récemment remis en culture pour satisfaire les demandes de plus en plus forte en surfaces. Le sol est très alcalin mais il est peu salé ; le pH eau est de 8.75 et peut atteindre 9 voire 10 à certains endroits de la parcelle. Il est pauvre en matière organique, en azote et en phosphore assimilable, et sa capacité d'échange cationique est faible.

Le sol 2 est situé dans une cuvette et présente une forte teneur en argile. Il est apparenté aux vertisols topomorphes grumosoliques en raison de son aspect friable en surface, de la présence de nodules calcaires, de fentes de retrait et de face de glissement. Le sol est modérément alcalin et peu salé. Il est plus riche que le sol 1 en matière organique et en éléments minéraux. Sa capacité d'échange cationique est plus élevée.

3.2.2 Dispositifs expérimentaux

Un dispositif soustractif a été utilisé pour chaque essai. Il s'agit de comparer deux modalités de gestion du système à la pratique des agriculteurs de la zone d'étude. Trois répétitions de chaque traitement ont été mises en place (trois traitements en réacteur fermé et quatre traitements dans l'essai en pot de culture).

Tableau 3.8 : identification des traitements utilisés dans le cadre de l'essai en flacons.

T1	Urée + Lame d'eau
T2	Urée. Absence de lame d'eau
T3	Lame d'eau. Absence d'apport d'urée

3.2.2.1 Flacon d'incubation au laboratoire (réacteur fermé)

50 grammes de terre fine sont placés dans un flacon de 250 cc à double fermeture étanche. Le sol est progressivement saturé puis submergé la veille de l'apport de 8mg N sous forme d'urée. Un tube contenant 8ml d'acide sulfurique 0.1N a été placé dans chaque flacon pour piéger l'ammoniac volatilisé.

Le dispositif a été conçu pour la comparaison de différentes modalités avec le traitement témoin (T1) correspondant à la pratique paysanne de la zone. Les autres traitements ont été menés de façon identique à l'exception d'une absence de lame d'eau (T2) ou d'une absence d'apport d'urée (T3) (tableau 3.8). Chaque traitement a été reproduit sous la forme de 3 répétitions. L'évolution du système a été suivie pendant une période de 14 jours à partir de l'apport d'urée (t=0).

Les différentes mesures ont été réalisées sur l'ensemble des pots du dispositif aux temps : t_0 (extrait 30mn après sa mise en place) ; t_0 + 6h ; t_0 + 1j ; t_0 + 3j ; t_0 + 7j et t_0 + 14 j (h = heures ; j = jour(s)). Les flacons ont ensuite été placés dans un incubateur à la température de 28°C.

Le pH a été mesuré *in situ* dans la lame d'eau et dans le sol dès l'ouverture du flacon et la récupération des tubes d'acide sulfurique. La mesure a d'abord été réalisée dans la lame d'eau qui a été ensuite prélevée à l'aide d'une seringue. La mesure a ensuite été réalisée dans le sol à une profondeur d'environ 1,5 cm (pénétration de l'électrode). Le flacon a ensuite été centrifugé à 4000t/mn pendant 15mn, puis le surnageant a été prélevé à l'aide d'une seringue. Une aliquote d'environ 20 g du culot a ensuite été prélevée et placé dans 100 ml d'une solution de KCl molaire pour l'extraction des formes d'azote minéral. Le mélange a été agité pendant deux heures, puis le surnageant a été prélevé à l'aide d'une seringue. Les différentes solutions ont été filtrées à 0.2 µm, puis stockées à 4°C dans des tubes stériles pour le dosage des formes ammoniacales et nitriques de l'azote par colorimétrie automatique.

La concentration de NH_3 en phase aqueuse a été calculée en fonction de l'équilibre entre les formes d'azote ammoniacal en solution :

$$NH_4^+ \leftrightarrow NH_3 + H^+ , pK = -9.2$$

La concentration de NH_3 en phase aqueuse (pNH_3) a alors été estimée de la façon suivante :

$$pNH_3 = \log(NH_4^+) + pH - 9.2$$

, où (NH_4^+) est la molalité de l'ion ammonium exprimé en moles/l.

3.2.2.2 Pot de culture sous serre

Environ 2700 g de sol ont été placés dans des pots carrés de (13.5*13.5) cm^2 sur une hauteur de 15 cm. Le sol a ensuite été progressivement saturé puis une lame d'eau de 5 cm a été créée. Le riz (variété kogoni 91-1) a été repiqué à raison d'une touffe de 3 plants par pot. Une dose de 240 mg de N sous forme d'urée a été apportée 3 jours après le repiquage. Cette dose correspond à un apport équivalent de 60 kgN/ha pour une densité moyenne de 25000 poquets par hectare, soit la moitié de la dose totale préconisée à l'Office du Niger pour l'ensemble du cycle cultural.

Le dispositif a été conçu pour la comparaison de différentes modalités avec un traitement témoin (T1) identique à celui de l'essai en flacons. Les autres traitements ont été menés de façon identique à l'exception d'une absence d'apport d'urée (T2), d'une absence de lame d'eau (T3) ou d'une absence de plants (T4). L'évolution du système a été suivie pendant une période de 28 jours à partir de l'apport d'urée (t=0).

Les évolutions du potentiel d'oxydoréduction (Eh) et de la température ont été contrôlées. En raison du nombre important de pots, seule la première répétition de chacun des traitements du Sol 1 a été suivie. 4 électrodes redox en verre à anneau de platine ont été installées dès la saturation du sol, puis connectés à une centrale (CR10X) pour l'acquisition du Eh toutes les 30 secondes, agrégés par la suite à un pas de temps horaire. Les mesures de pH ont été réalisées *in situ* à l'aide d'une électrode pH de pénétration (électrode à gel sans entretien) sur l'ensemble des pots du dispositif aux temps : t_0=0 ; t_0 + 1j ; t_0 + 3j ; t_0 + 7j ; t_0 + 14j et t_0 + 28 j. Une aliquote de la lame d'eau a été prélevée à l'aide d'une seringue sur l'ensemble des pots aux mêmes temps de mesure. Des échantillons de sol ont été prélevés aux temps : t_0=0, t_0+7j et t_0+28j sur toute la profondeur du pot à l'aide d'un tube. Une aliquote de 20 g de sol environ a été placée dans une solution de 100 ml de KCl molaire.

Tableau 3.9 : identification des traitements utilisés dans le cadre de l'essai en pot de culture

T1	Urée + Lame d'eau + Riz
T2	Lame d'eau + Riz. Absence d'urée
T3	Urée + Riz. Absence de lame d'eau
T4	Urée + lame d'eau. Absence de riz

La suspension de sol a été ensuite agitée pendant deux heures, puis le surnageant a été prélevé. Les différentes solutions ont été filtrées à 0.2 µm, puis stockés à 4°C dans des tubes stériles pour le dosage des formes d'azote minéral par colorimétrie automatique. A la fin de l'expérimentation, les 18 touffes de riz ont été prélevées pour la mesure de la matière sèche et de la teneur en azote. Il faudra retenir que la totalité des plants du sol 1 ont séché avant la fin de l'expérimentation.

Les traitements sont présentés dans le tableau 3.9. Chaque traitement a été reproduit sous la forme de 3 répétitions.

2.2.2.3 Suivi au champ

Le sol 1 étudié en laboratoire a fait l'objet d'un suivi de son fonctionnement pendant l'ensemble de la saison rizicole 1998 (Condom, 2000). Les résultats obtenus ont été utilisés comme référence pour la discussion de ceux obtenus au laboratoire. Seules les mesures réalisées dans l'horizon 0-15 cm correspondant aux échantillons de sol utilisés au laboratoire seront présentés.

Le pH et le potentiel d'oxydoréduction (Eh) ont été mesurés sur le terrain dans une carotte de sol immédiatement après son prélèvement à la tarière, à l'aide d'une électrode pH de pénétration sans entretien (électrolyte gélifié) et d'une électrode redox en verre à anneau de platine, respectivement. Trois mesures ont été faites chaque semaine. Les valeurs de pH et Eh affichées pendant une durée de 1 minute ont été retenues même si l'équilibre ne semble pas toujours totalement atteint. La solution du sol à l'aide de bougies poreuses sans dépression du fait de la présence d'une lame d'eau permanente et la lame d'eau ont été collectées chaque semaine. Les échantillons sont filtrés à 0.2 µm, puis stockés à 4°C dans des flacons stériles. La composition des solutions en Ca, Mg, K, Na, Cl, SO_4, et Si a été analysée. L'alcalinité a été calculée à partir du bilan ionique. La pression partielle en CO_2 a été calculée à l'aide du modèle de spéciation GYPSOL (Valles *et al.*, 1987; Valles & Bourgeat, 1988) à partir de la composition des solutions et du pH mesuré *in situ*. Le suivi de la culture et les principales phases de la gestion de l'irrigation, ont été consignés en concertation avec l'agriculteur.

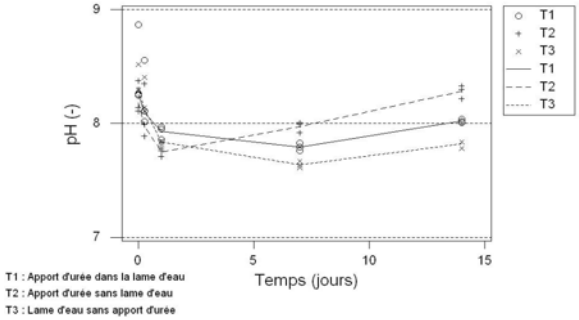


Figure 3.20 : pH du sol mesuré *in situ* sur le sol 1 (alcalin)

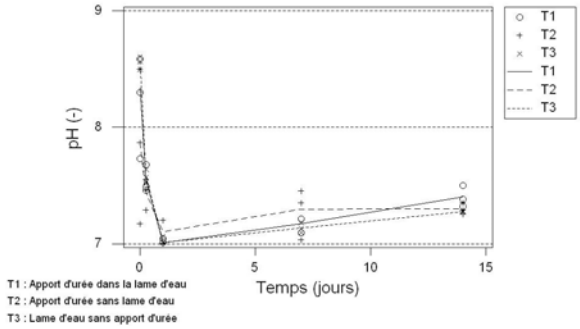


Figure 3. 21 : pH du sol mesuré *in situ* sur le sol 2 (modérément alcalin)

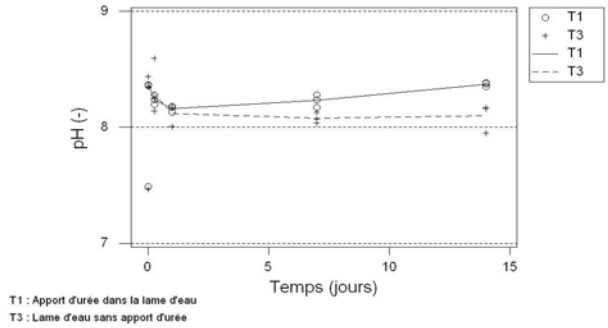


Figure 3. 22 : pH de la lame d'eau mesuré *in situ* sur le sol1

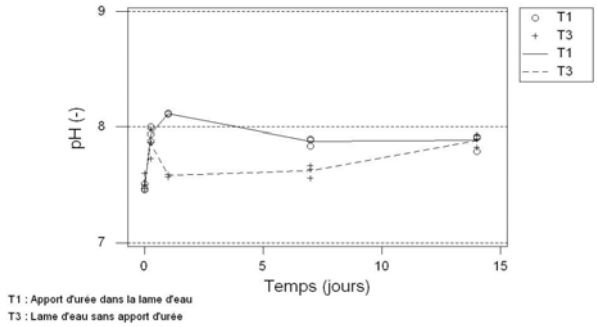


Figure 3. 23 : pH de la lame d'eau mesuré *in situ* sur le sol 2

3.3 Résultats

3.3.1 Expérimentation en flacons

3.3.1.1 Evolution du pH *in situ*

Les figures 3.20 à 3.23 montrent les valeurs de pH mesurées dans le sol et la lame d'eau à l'ouverture des flacons pour les deux échantillons de sol aux différents temps de mesure. Elles sont complétées par une présentation de l'évolution temporelle du pH moyen.

La phase initiale fait suite à la mise en eau des échantillons la veille de l'apport d'urée et du début de l'expérimentation. Dans le sol, elle est caractérisée par un pH élevé qui baisse rapidement au cours du premier jour pour les deux échantillons (figure 3.20 e 3.21). Dans la lame d'eau, les variations initiales de pH sont à la fois moins marquées et opposées entre les deux échantillons de sol. Pour l'échantillon de sol alcalin (Sol 1) figure 3.22, les évolutions sont comparables à celles observées dans le sol. Pour l'échantillon de sol peu alcalin (Sol 2) figure 3.23, l'évolution initiale est marquée par une augmentation du pH. Aucune différence significative entre les différents traitements ne se manifeste à ce stade. Au-delà du premier jour, les valeurs de pH mesurées tendent à se stabiliser en même temps que des différences se manifestent entre les différents traitements.

Ces différences sont significatives à partir du jour 7 jusqu'à la fin de l'expérimentation, à l'exception des pH mesurés in situ sur le sol peu alcalin (sol 2). Dans la lame d'eau du sol 2, l'effet est significatif dès le jour 1.

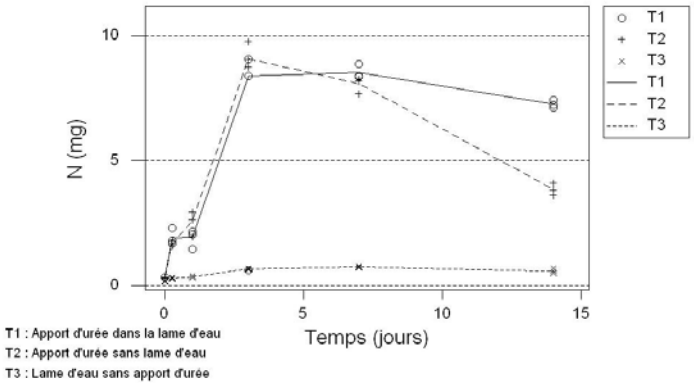


Figure 3. 24 : évolution du stock d'azote minéral dans le sol et la lame d'eau du sol1

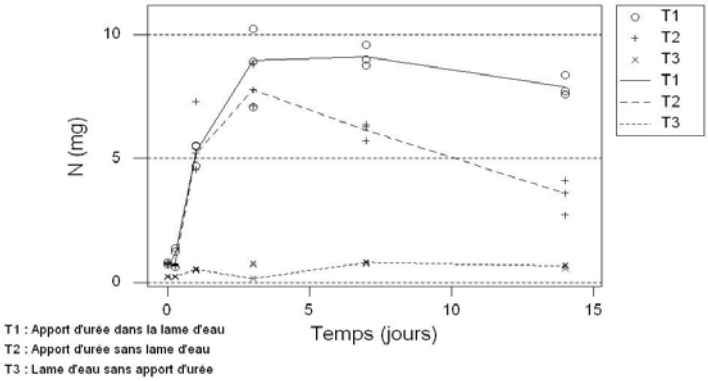


Figure 3. 26 : évolution du stock d'azote minéral dans le sol et la d'eau du sol2

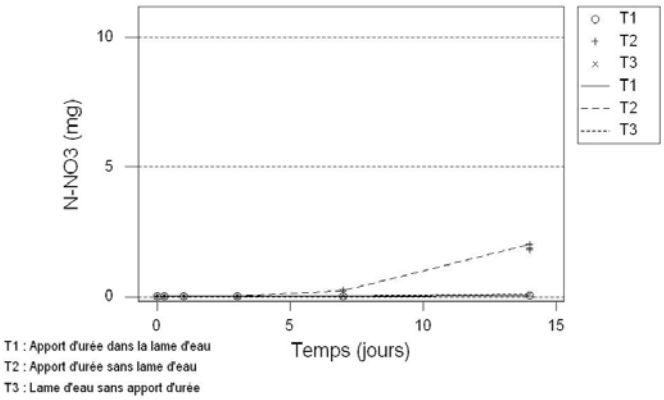


Figure 3. 25 ; évolution du stock d'azote nitrique dans le sol et la lame d'eau du sol 1

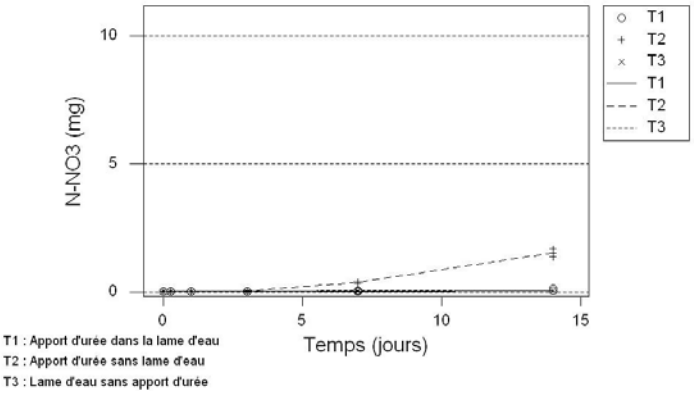


Figure 3. 27 : évolution du stock d'azote nitrique dans le sol et la lame d'eau du sol 2

3.3.1.2 Evolution de l'azote minéral

Les résultats sont présentés pour ce qui concerne l'évolution du stock d'azote minéral dans les flacons incluant la phase adsorbée, la solution du sol et la lame d'eau (fig. 3.24 et 3.26). La plus grande partie de l'azote est présente sous forme ammoniacale dans la phase adsorbée et l'évolution de l'azote nitrique a été ensuite distinguée (figures 3.25 et 3.27).

Les quantités d'azote minéral restent très faibles en l'absence d'apport d'urée (inférieures à 50kgN/ha). Elles augmentent très légèrement au cours de l'incubation et la minéralisation nette apparaît positive. Cette minéralisation nette semble moins importante sur le sol peu alcalin mais aussi plus argileux (sol 2), et ce malgré une teneur en matière organique sensiblement plus élevée. Les évolutions sont globalement comparables entre les deux échantillons de sol. La quasi-totalité de l'urée est hydrolysée après 3 jours d'incubation. L'hydrolyse de l'urée apparaît plus rapide sur le sol 1 où la quantité d'azote minéral dans le flacon après 1 jour d'incubation est significativement supérieure à celle du sol 2. Pendant la seconde phase de l'incubation (après le jour 3), on observe une réduction de la quantité d'azote minéral et des différences se manifestent entre les traitements.

La comparaison des traitements T2 et T3 met en évidence une influence significative de la lame d'eau sur l'évolution du stock d'azote minéral. En l'absence de lame d'eau (T2), la diminution de la teneur en azote minéral est significativement plus importante et environ la moitié du stock d'azote minéral contenu dans la phase adsorbée, la solution du sol et la lame d'eau a disparu. Cette diminution reste modérée en présence d'une lame d'eau.

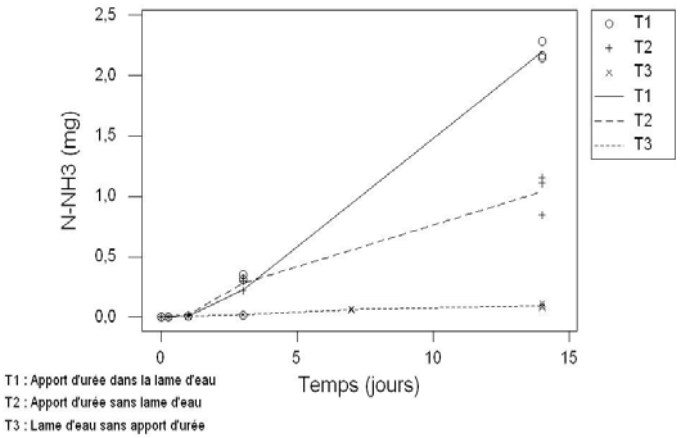


Figure 3. 28 : pertes d'azote ammoniacal sur le sol1

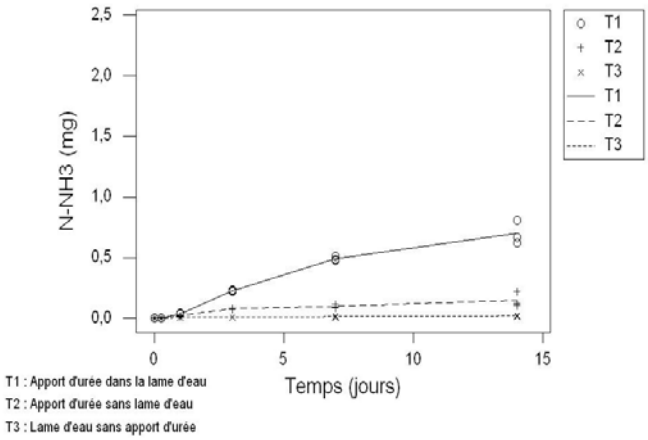


Figure 3. 29 : pertes d'azote ammoniacal sur le sol2

3.3.1.3 Volatilisation de l'ammoniac

Les quantités d'ammoniac piégées dans l'acide sulfurique ont été représentées dans les figures 3.28 et 3.29. La volatilisation d'ammoniac est négligeable durant la première journée, puis s'accroît pendant toute la durée de l'incubation. Les pertes sont significativement plus élevées sur le sol alcalin (sol 1) à l'exception du jour 1,. Ces observations apparaissent cohérentes avec les évolutions de la pNH_3 calculée dans la lame d'eau (T1 et T3) ou dans la solution du sol (T2) (figures 3.30 et 3.31). La pNH_3 est moins élevée sur le traitement T2 par rapport au traitement T1 en raison d'une plus faible concentration en ammonium sous l'influence conjointe de son adsorption et de sa transformation par nitrification, et ce malgré des valeurs de pH plus élevés.

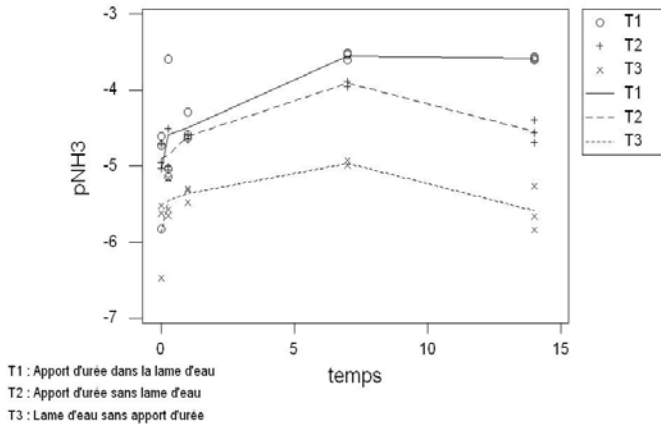


Figure 3. 30 : évolution de la concentration calculée de NH3 en phase aqueuse dans la solution du sol (T2) ou dans la lame d'eau (T1 et T3) sur sol1

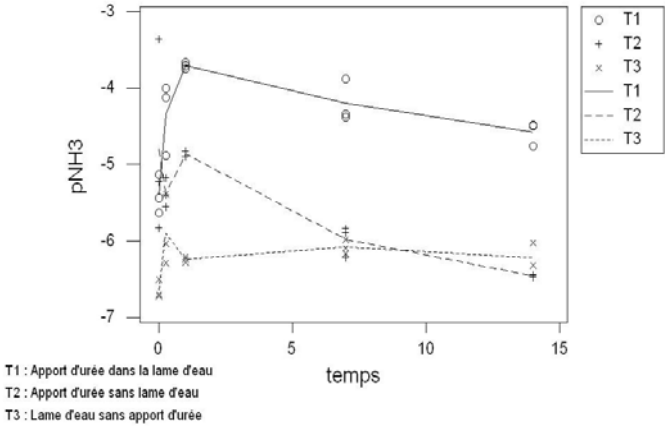


Figure 3. 31 : évolution de la concentration calculée de NH3 en phase aqueuse dans la solution du sol (T2) ou dans la lame d'eau (T1 et T3) sur sol2

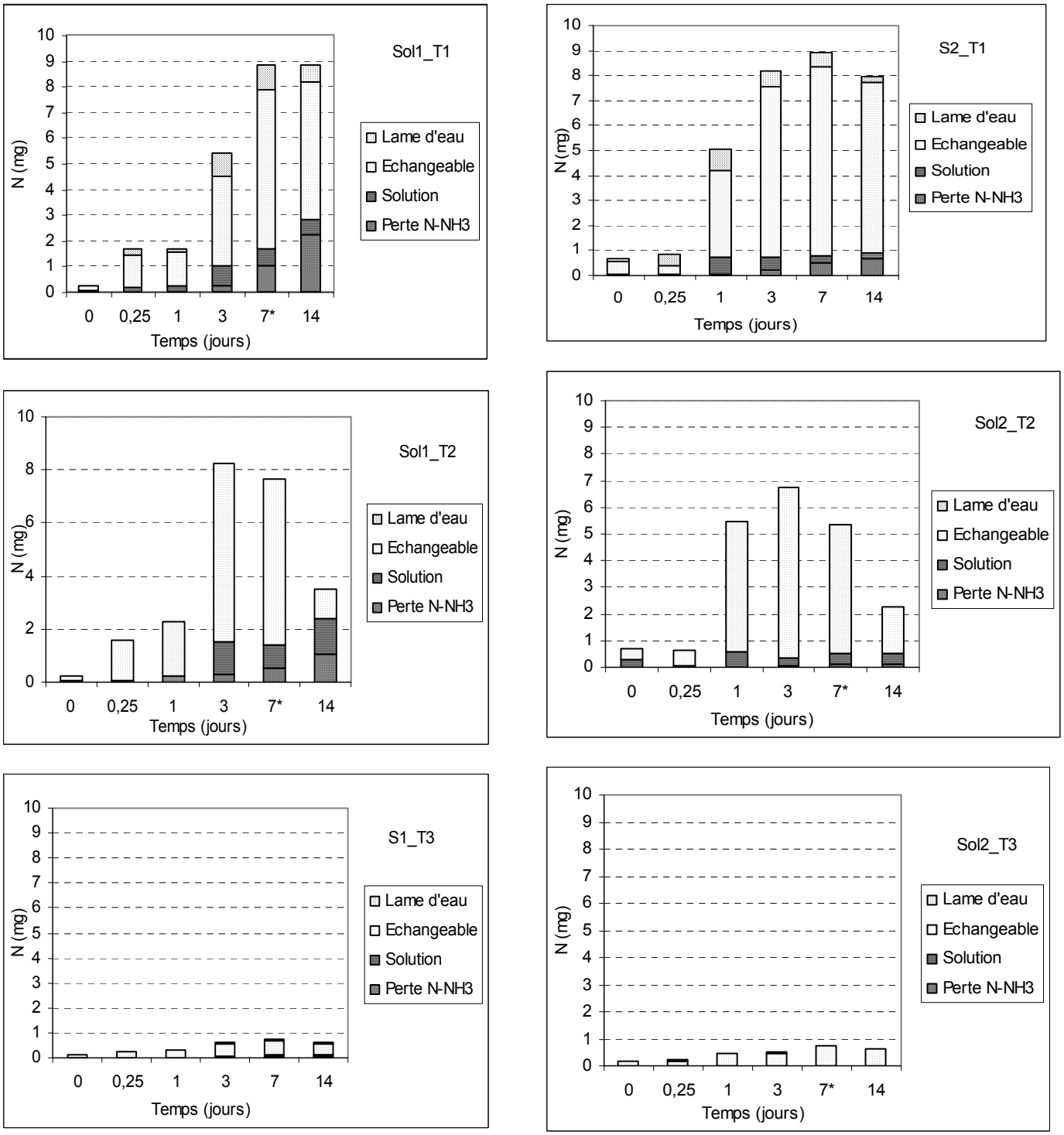


Figure 32 : Bilan d'azote mesuré dans les flacons

T1 = après apport d'urée dans la lame d'eau ; T2 = sans apport d'urée ; T3 = après apport d'urée dans la lame d'eau ; S1 = sol alcalin (figures 3.32 à 3.34) ; S2 = sol peu alcalin (figures 3.35 à 3.37)

3.3.1.4 Bilan d'azote

Le bilan des différents résultats obtenus a été présenté en distinguant les évolutions des différents compartiments du système que sont la phase adsorbée, la solution du sol, la lame d'eau et les pertes par volatilisation d'ammoniac (figures 3.32). Les valeurs manquantes de volatilisation d'ammoniac au jour 7 sur le sol 1 ont été estimées par interpolation (cf. figure 3.28).

La phase adsorbée est le principal compartiment d'azote minéral du système en relation avec la prédominance de l'ammonium ; la proportion est notablement plus importante sur le sol 2 en relation avec une capacité d'échange cationique plus élevée. Le traitement T2 fait exception à l'issue de la période d'incubation suite à une nitrification importante en l'absence de lame d'eau. La volatilisation d'ammoniac n'apparaît vraiment significative que sur le sol alcalin (sol 1) et les proportions d'azote contenues dans la lame d'eau ou la solution du sol restent le plus souvent marginales.

Le fait marquant de ces résultats relève plutôt d'un défaut de bilan important pour les traitements T2 sans lame d'eau et, dans une moindre mesure, le traitement T1 sur le sol 2. Le sol 2 apparaît plus affecté que le sol 1. Ces évolutions sont en cohérence avec l'apparition de nitrate NO_3^- dans la solution du sol et ont été attribuées à des pertes par dénitrification bien qu'aucune mesure directe n'ait été réalisée. A l'issue de l'incubation, ces pertes porteraient sur environ 60% de l'azote minéral sur le sol 1 et jusqu'à près de 80% sur le sol 2. En l'absence de lame d'eau, les risques de perte d'azote par dénitrification apparaissent plus élevés que ceux liés à la volatilisation de l'ammoniac, notamment lorsque le sol n'est pas très alcalin.

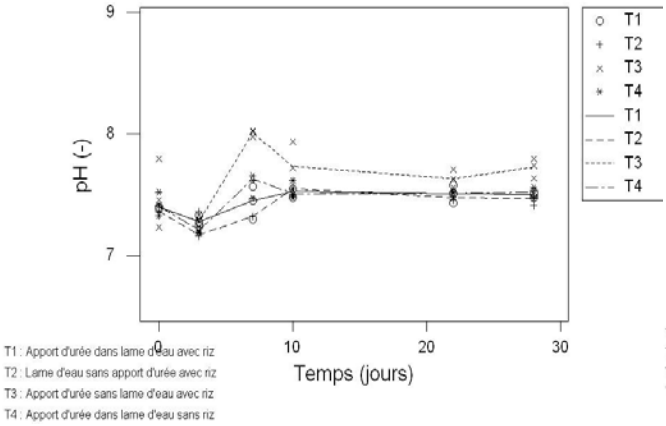


Figure 3. 33 : pH sol mesuré dans le pot *in situ* sur le sol1 (alcalin)

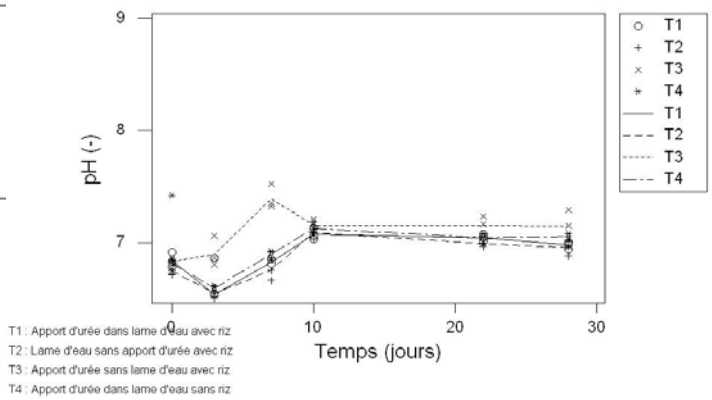


Figure 3. 35 : pH sol mesuré dans le pot *in situ* sur le sol2 (modérément alcalin)

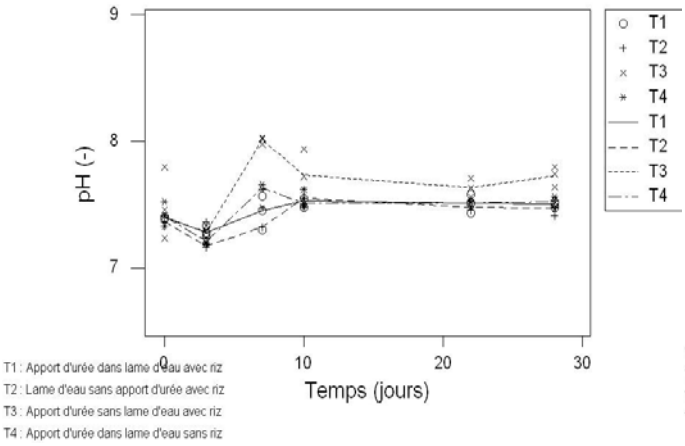


Figure 3. 34 : pH de la lame d'eau mesuré *in situ* sur le sol1 (alcalin)

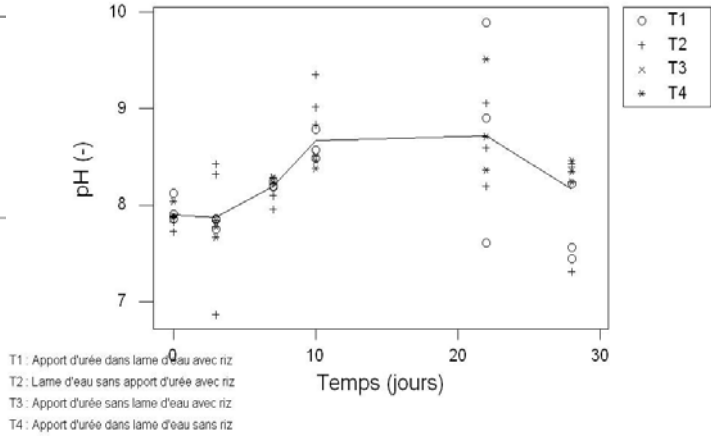


Figure 3. 36 : pH de la lame d'eau mesuré *in situ* sur le sol2 (modérément alcalin)

3.3.2 Expérimentation en pots

3.3.2.1 Evolution du pH et du potentiel d'oxydoréduction in situ

Evolution du pH

Les figures 3.33 à 3.36 montrent l'évolution du pH mesuré *in situ* dans le sol et la lame d'eau. La phase initiale fait suite à une période progressive de saturation du sol, puis de mise en place de la lame d'eau qui conduit à ce que le système apparaisse relativement stable au début de l'expérimentation. Dans le sol, le pH initialement peu élevé décroît tout d'abord légèrement, puis augmente progressivement jusqu'au dixième jour pour se stabiliser ensuite jusqu'à la fin de l'expérimentation. Les tendances évolutives sont comparables dans la lame d'eau qui se différencie par des valeurs sensiblement plus élevées. Sur le sol 1, elles atteignent des valeurs proches de 9 à partir du jour 10 et jusqu'à l'issue de l'expérimentation. Sur le sol 2, les valeurs de pH mesurées sont aussi relativement élevées (pH supérieur à 8).

Evolution du potentiel d'oxydoréduction

Sur la figure 3.37 on observe une diminution rapide du potentiel redox similaire pour tous les traitements à l'exception du traitement T3 (sans lame d'eau) où se succèdent différentes phases d'oxydation lors des assecs et de réduction suite à la réhumectation périodique du sol. Les valeurs de potentiel redox atteignent des valeurs négatives après quelques jours de submersion, puis se stabilisent progressivement vers –200mV à l'issue de l'expérimentation.

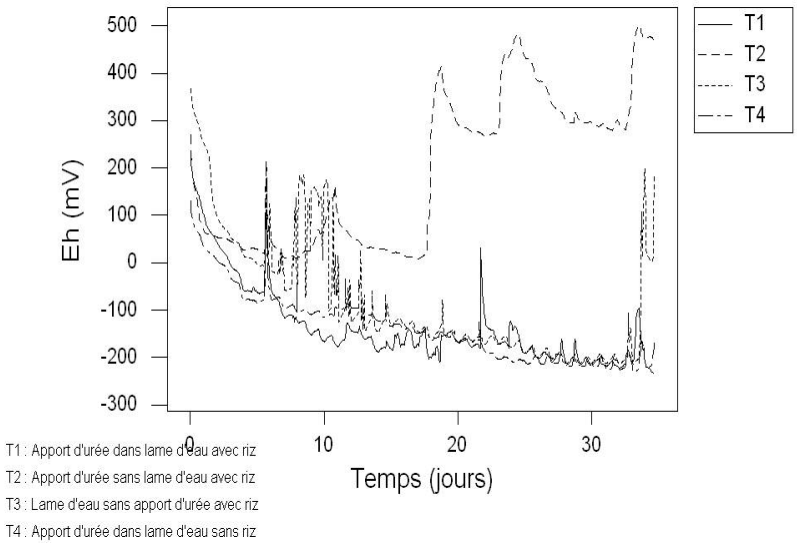


Figure 3. 37 : évolution du potentiel d'oxydoréduction mesuré *in situ* dans le sol alcalin

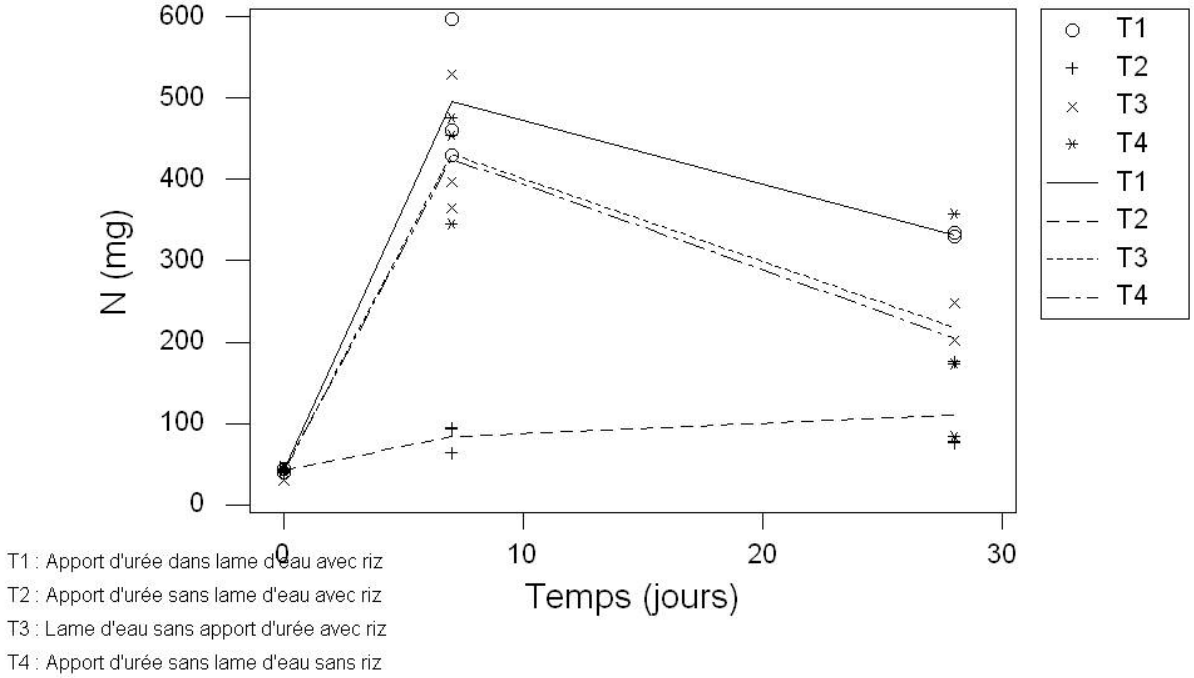


Figure 3. 38 : évolution du stock d'azote minéral dans le sol 1 (alcalin)

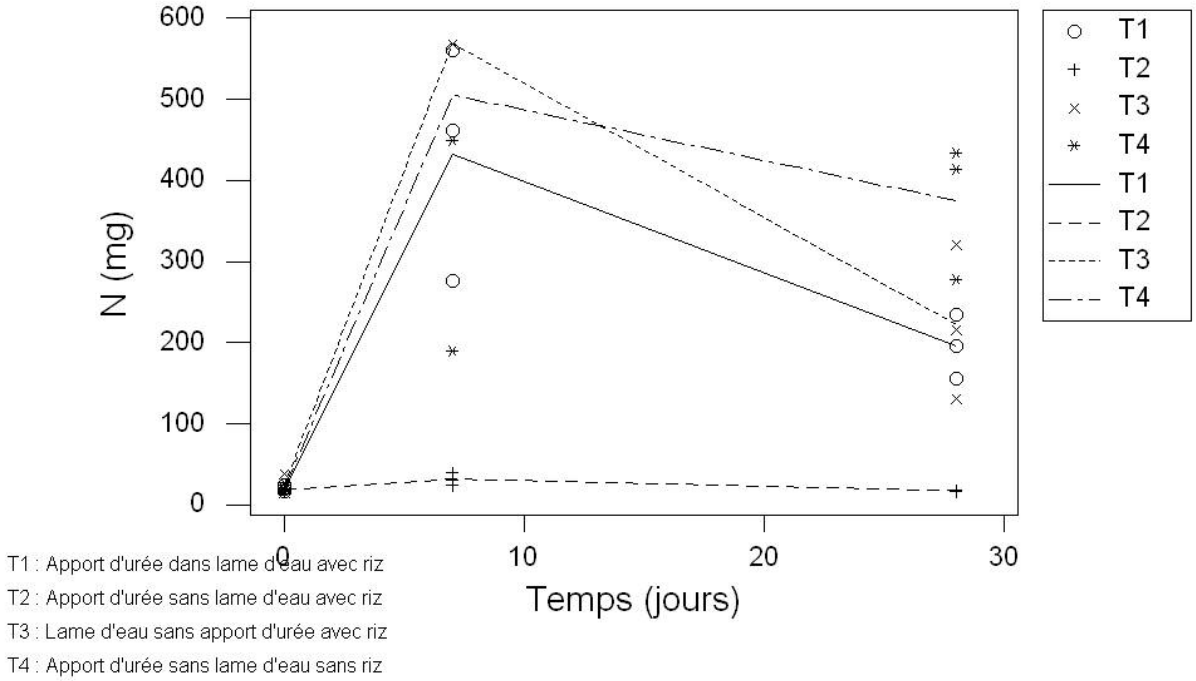


Figure 3. 39 : évolution du stock d'azote minéral dans le sol 2 (peu alcalin)

3.3.2.2 Evolution de l'azote minéral dans les pots

Les évolutions des stocks d'azote minéral incluant la phase adsorbée, la solution du sol, la lame d'eau et les plants de riz ont été représentées dans les figures 3.38 et 3.39 pour les 3 dates de mesure : 0,7 et 28 jours après l'apport d'urée. Ces évolutions n'incluent pas les émissions gazeuses qui n'ont pas été mesurées dans l'expérimentation.

Le traitement T2 montre que le sol ne contribue que de façon marginale à la fourniture d'azote minéral. Comme dans le cas des expérimentations en flacons, la minéralisation nette apparaît sensiblement plus importante pour le sol 1 que pour le sol 2.

Après 7 jours, les quantités d'azote minéral atteignent leurs valeurs maximales et on n'observe aucune différence significative entre les différents traitements et types de sol. Les quantités mesurées dépassent largement les 240 mg N apportés sous forme d'urée et semblent indiquer l'existence d'un biais systématique qui pourrait être lié à une sur représentation des horizons superficiels dans les prélèvements. Les ordres de grandeur entre les différents pots de culture restent néanmoins cohérents.

Après 28 jours, on observe une diminution du stock d'azote minéral sur l'ensemble des traitements et types de sol. Sur le sol 1 alcalin, ces pertes sont significativement supérieures sur les traitements T3 (sans lame d'eau) et T4 (sans plante) par rapport au traitement témoin T1. Sur le sol 2 peu alcalin, le traitement T3 (sans lame d'eau) ne se différencie pas du traitement témoin T1, tandis que le traitement T4 (sans plante) montre des pertes significativement moins importantes

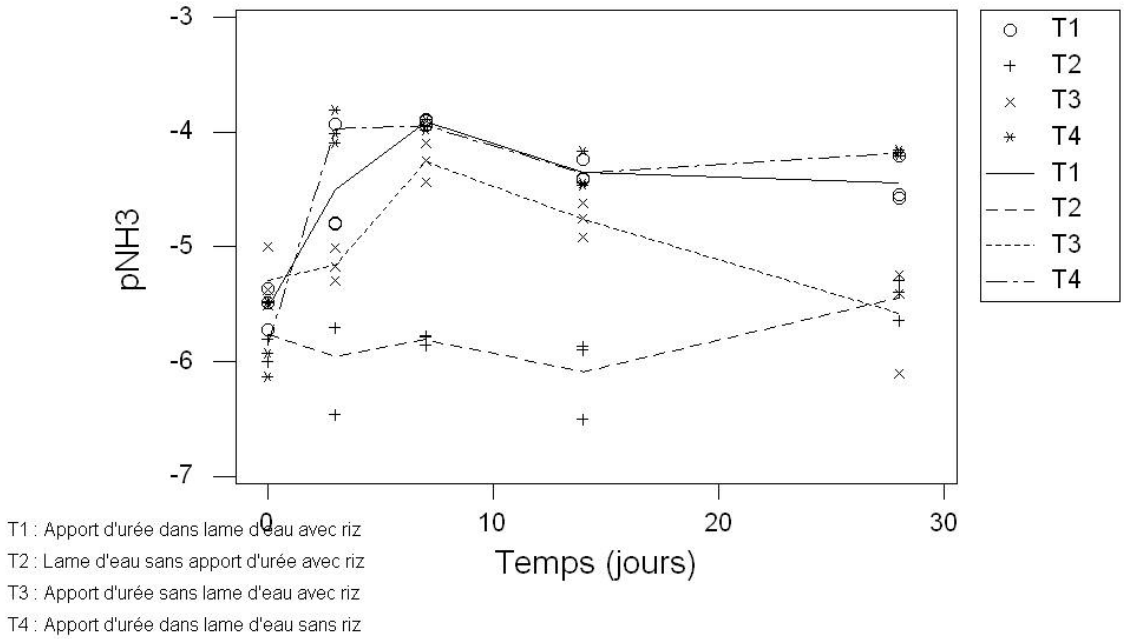


Figure 3. 40 : évolution de la concentration calculée de NH3 en phase aqueuse (sol1)

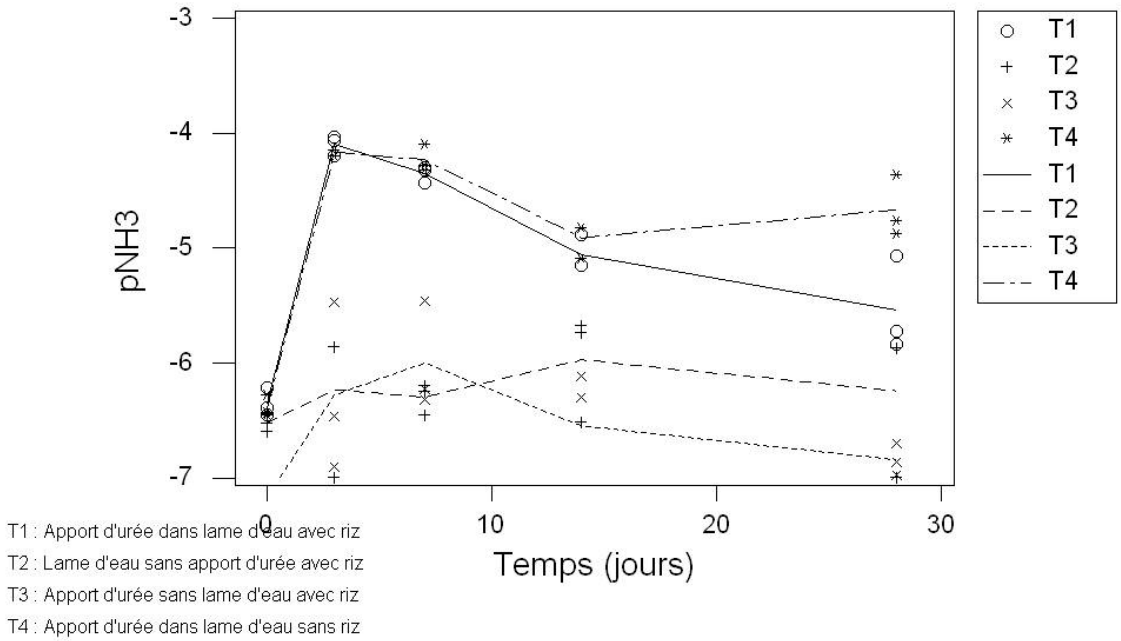


Figure 3. 41 : évolution de la concentration calculée de NH3 en phase aqueuse (sol2)

Afin d'estimer l'importance relative de ces processus, nous avons étudié successivement : les évolutions de NH_3 en phase aqueuse (pNH_3) comme précurseur de la volatilisation d'ammoniac et l'évolution des formes d'azote nitrique comme précurseur de la dénitrification.

Les valeurs calculées de pNH_3 (figures 3.40 et 3.41) sont comparables aux valeurs calculées lors de l'expérimentation en flacon où leur cohérence avait pu être validée par la mesure directe des pertes par volatilisation de NH_3. Le risque de volatilisation de NH_3 apparaît systématiquement supérieur sur le sol 1 (alcalin) par rapport au sol 2 pour chacun des traitements. Sur le sol 2 (peu alcalin), les pertes attendues sont faibles sur les traitements T2 (sans apport d'urée), mais aussi pour le traitement T3 (sans lame d'eau). Elles sont sensiblement plus élevées sur les traitements T1 et T4 en présence d'une lame d'eau. Sur le sol 1 (alcalin) le traitement T2 (sans lame d'eau) présente un comportement intermédiaire avec un risque de perte assez élevé après l'apport se réduisant fortement vers la fin de l'expérimentation. Les écarts observés entre les traitements T1 et T4 ne sont significativement différents qu'à l'issue de l'expérimentation avec un risque de perte plus élevé sur le traitement T4 (absence de plante). Ces résultats ne sont pas en mesure d'expliquer les évolutions observées des stocks d'azote minéral dans les pots.

L'évolution du stock d'azote nitrique dans les pots est représentée par les figures 3.42 et 3.43. Si la quantité d'azote nitrique est très faible dans les traitements T1, T2 et T4 en présence d'une lame d'eau, elle représente par contre la quasi-totalité de la teneur en azote dans le système à l'issue de l'expérimentation dans le traitement T3 (sans lame d'eau) pour les deux types de sol. Cette situation est susceptible d'induire des pertes d'azote par dénitrification et permettrait d'expliquer les importants défauts de bilans observés sur le traitement T3.

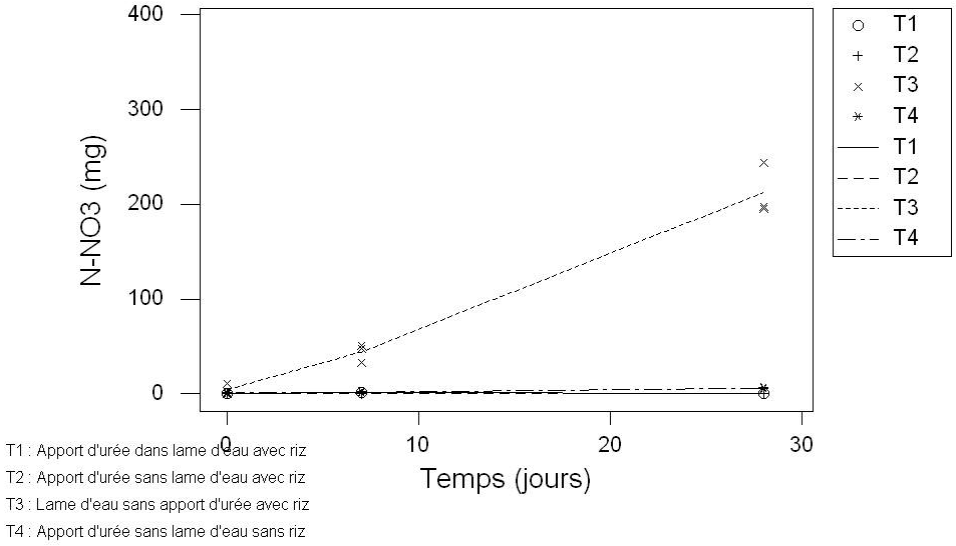


Figure 3. 42 : évolution du stock d'azote nitrique dans les pots (sol1)

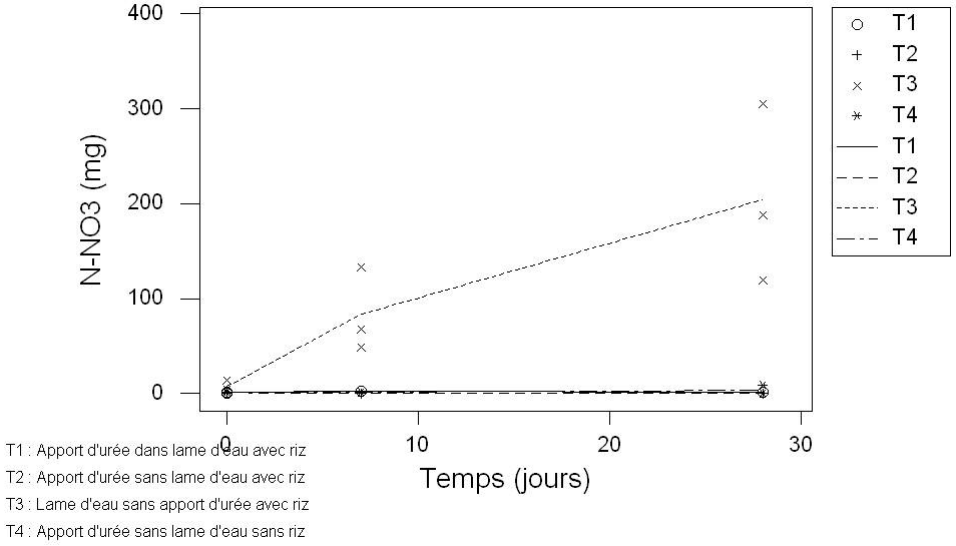


Figure 3. 43 : évolution du stock d'azote nitrique dans les pots (sol1)

Pour analyser le comportement des traitements T1 et T4, nous avons focalisé notre attention sur l'évolution des formes d'azote minéral dans la lame d'eau en supposant qu'elles permettent de rendre compte des processus intervenants non seulement dans la lame d'eau mais aussi dans la mince couche superficielle du sol oxydée, et même si les quantités observées restent très faibles par rapport aux autres termes du bilan (figures 3.44 à 3.49).

L'hydrolyse de l'urée apparaît plus rapide sur le sol 2 où la quantité maximale d'azote minéral est obtenue au bout de 3 jours au lieu de 7 jours pour le sol 1 (alcalin). Dans le même temps, les teneurs en azote ammoniacal atteignent des valeurs moins élevées sur le sol 1 (alcalin)

La diminution des teneurs en azote qui s'en suit est plus rapide sur le sol 2 (peu alcalin) ; elle semble d'abord résulter de l'influence de phénomène d'adsorption de l'ammonium sur ce sol plus argileux, puis de la transformation de l'azote ammoniacal par nitrification. Le décalage de ces deux processus conduit à une diminution temporaire de la teneur en azote minéral dans la lame d'eau au jour 7. L'augmentation de la teneur en nitrate résultant de la nitrification de l'azote sous forme ammoniacale en surface du sol et dans la lame d'eau, se manifeste à partir du jour 7 pour le sol 1 (alcalin), et du jour 3 pour le sol 2 (peu alcalin). Elle atteint ensuite une valeur maximale au jour 14, comparable sur les deux types de sol.

La fin de l'expérimentation est caractérisée par une diminution de la teneur en azote minéral, principalement de sa forme nitrique qui semble témoigner de l'existence de processus de dénitrification. Sur le sol 1 (alcalin), le traitement T4 (sans plante) se différencie du traitement témoin T1 par une teneur en nitrate significativement plus élevé. Sur le sol 2 (peu alcalin), les différences ne sont pas significatives.

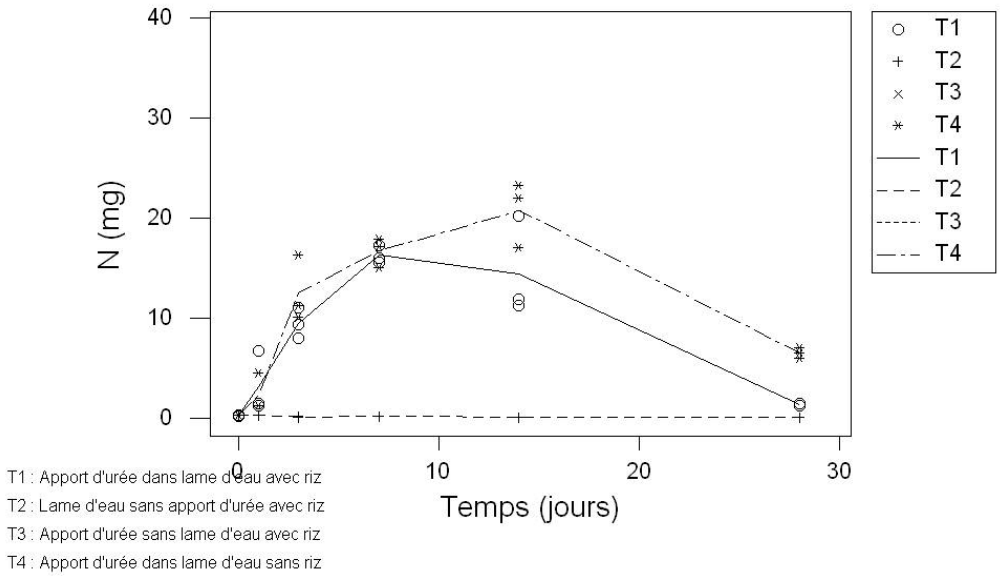


Figure 3. 44 : évolution des teneurs en azote minéral dans la lame d'eau (Sol1)

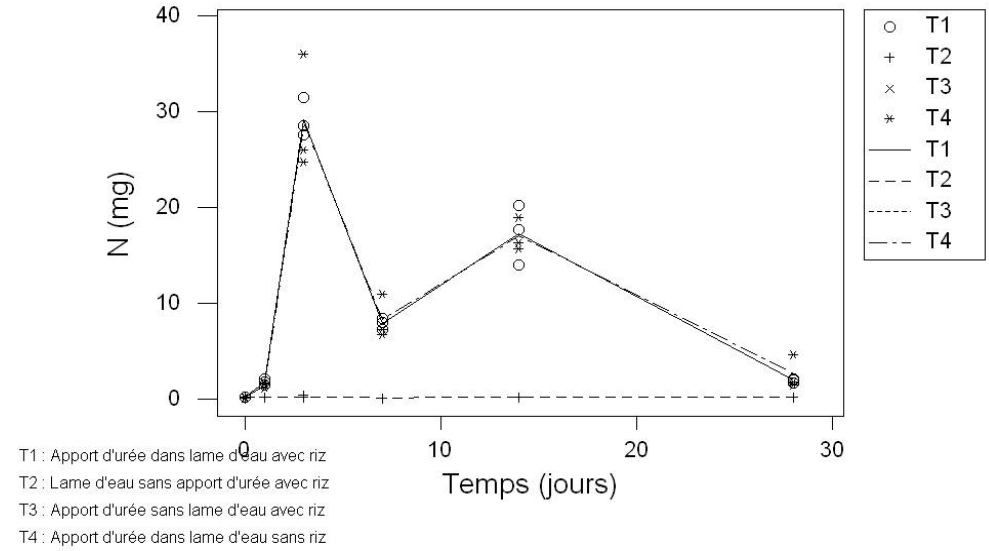


Figure 3. 45 : évolution des teneurs en azote minéral dans la lame d'eau (Sol2)

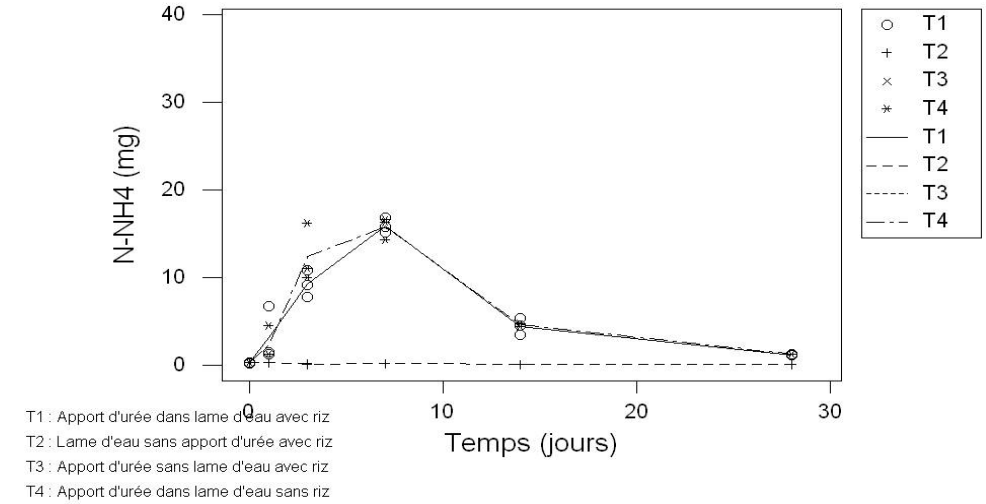


Figure 3. 46 : évolution des teneurs en azote ammoniacal dans la lame d'eau (Sol1)

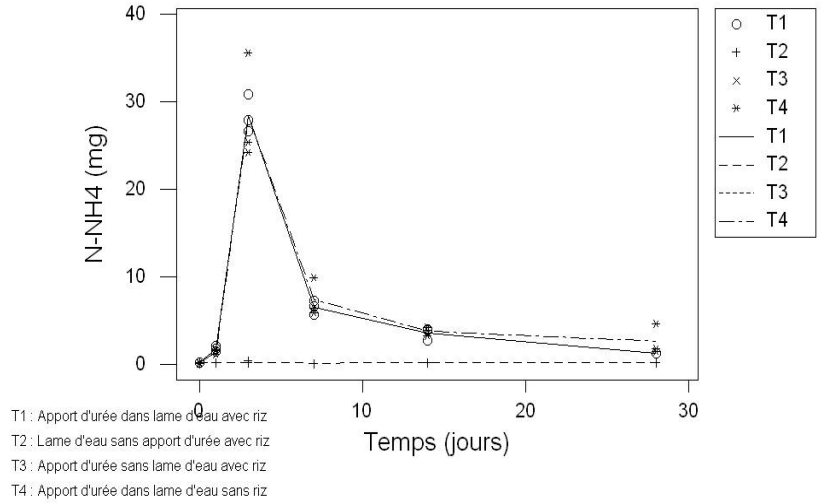


Figure 3. 47 : évolution des teneurs en azote ammoniacal dans la lame d'eau (Sol2)

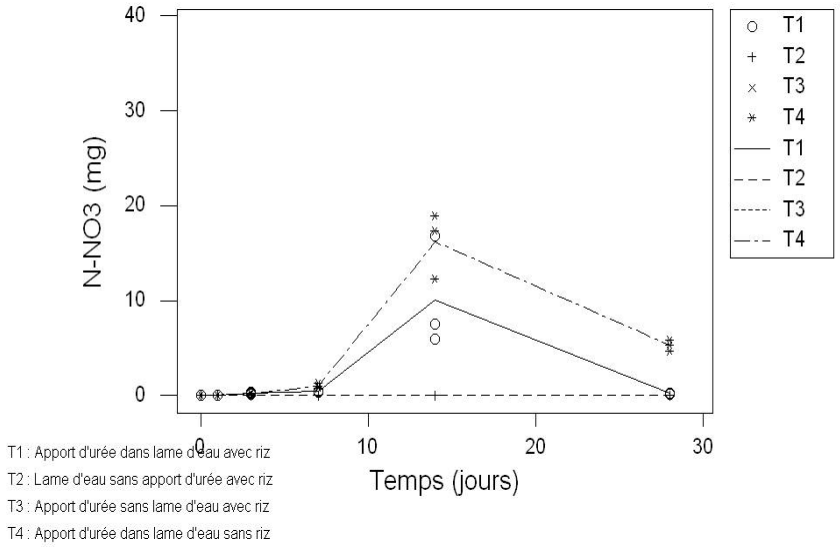


Figure 3. 48 : évolution des teneurs en azote nitrique dans la lame d'eau (Sol1)

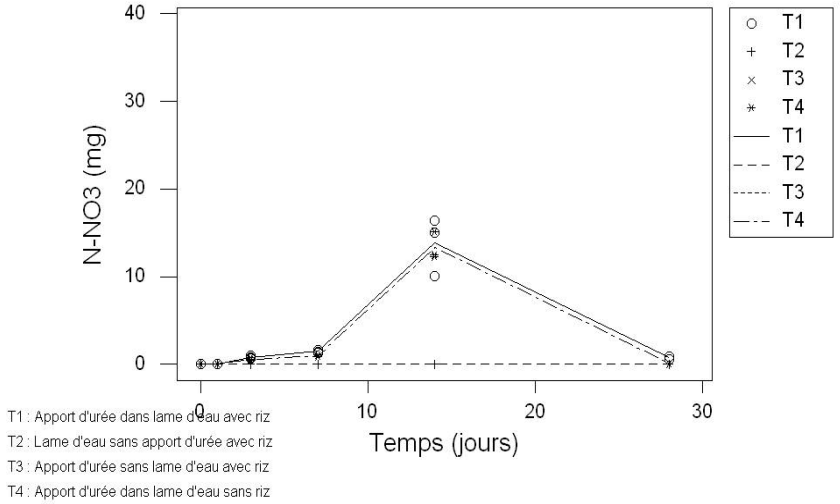


Figure 3. 49 : évolution des teneurs en azote nitrique dans la lame d'eau (Sol2)

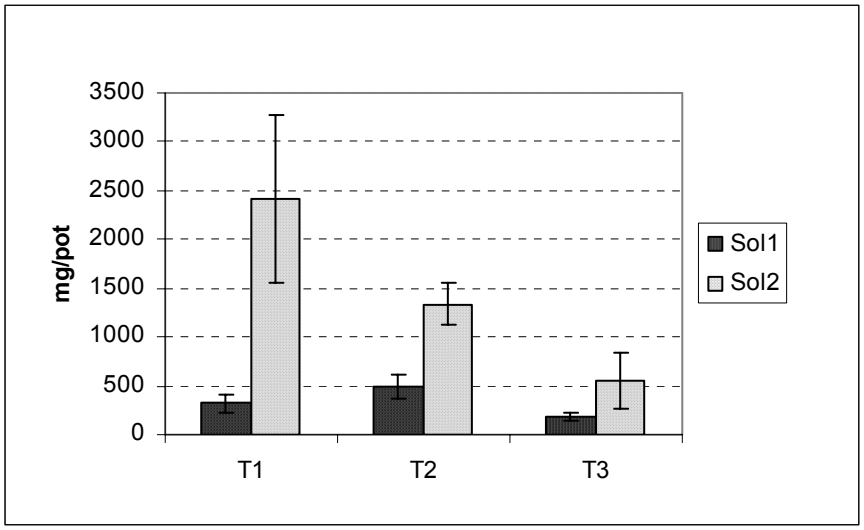


Figure 3. 50 : production de matière sèche sur les sols 1 et 2

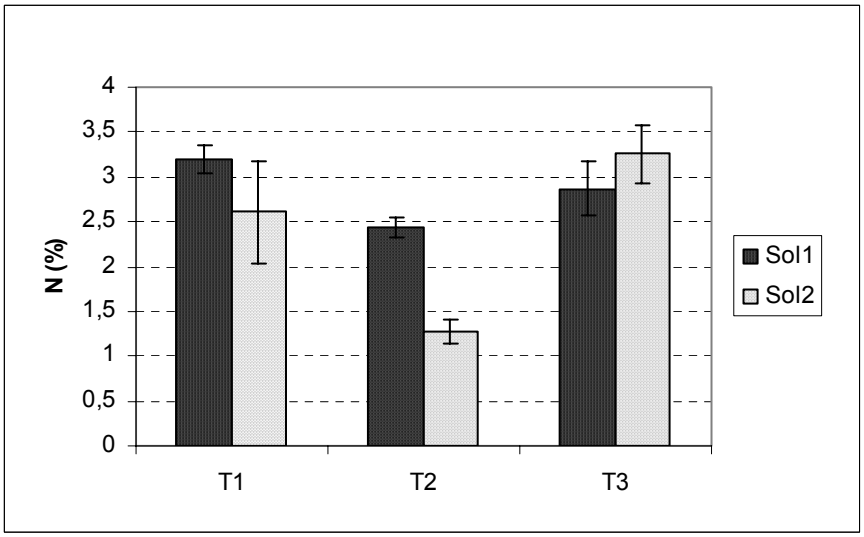


Figure 3. 51 : teneur du riz en azote sur les sols 1 et 2

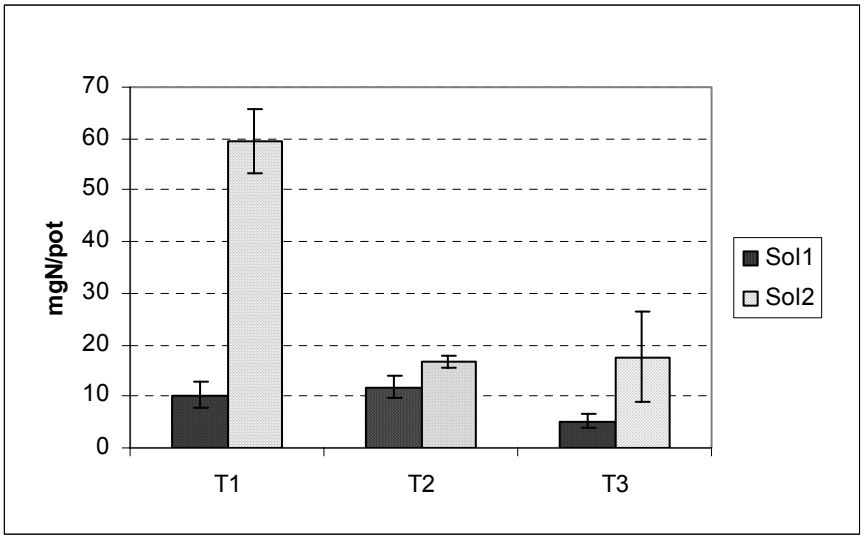


Figure 3. 52 : exportation de l'azote par la plante sur les sols 1 et 2

3.3.2.3 Production de matière sèche et exportation d'azote par la plante

Les résultats sont présentés pour ce qui concerne la production de matière sèche, la teneur en azote des plants de riz et le prélèvement d'azote.

Sur le sol 1 (alcalin), les plants ont séché avant la fin de l'expérimentation et les productions de matière sèche (figure 3.50) comme les prélèvements d'azote (figure 3.52) sont très faibles. Dans le même temps, les teneurs en azote (figure 3.51) sont normales et laissent à penser que l'alimentation azotée n'est pas à l'origine de la mortalité des plants qui serait plutôt due aux conséquences de pH très alcalins. Ce constat est renforcé par la mesure concomitante de fortes quantités d'azote minéral dans les sols.

Sur le sol 2, l'impact des différents traitements apparaît plus nettement. Sur le traitement T3 (sans lame d'eau), la production de matière sèche et les exportations d'azote sont significativement moindres par rapport au traitement témoin T1. Comme pour le sol 1, ce résultat apparaît davantage lié à la valeur de pH plus élevé qu'à l'influence de la nutrition azotée. L'effet de la nutrition azotée se fait sentir sur le traitement T2 (sans apport d'urée) pour lequel la production de matière sèche, la teneur en azote et les prélèvements d'azote sont significativement inférieures à celle du traitement témoin T1.

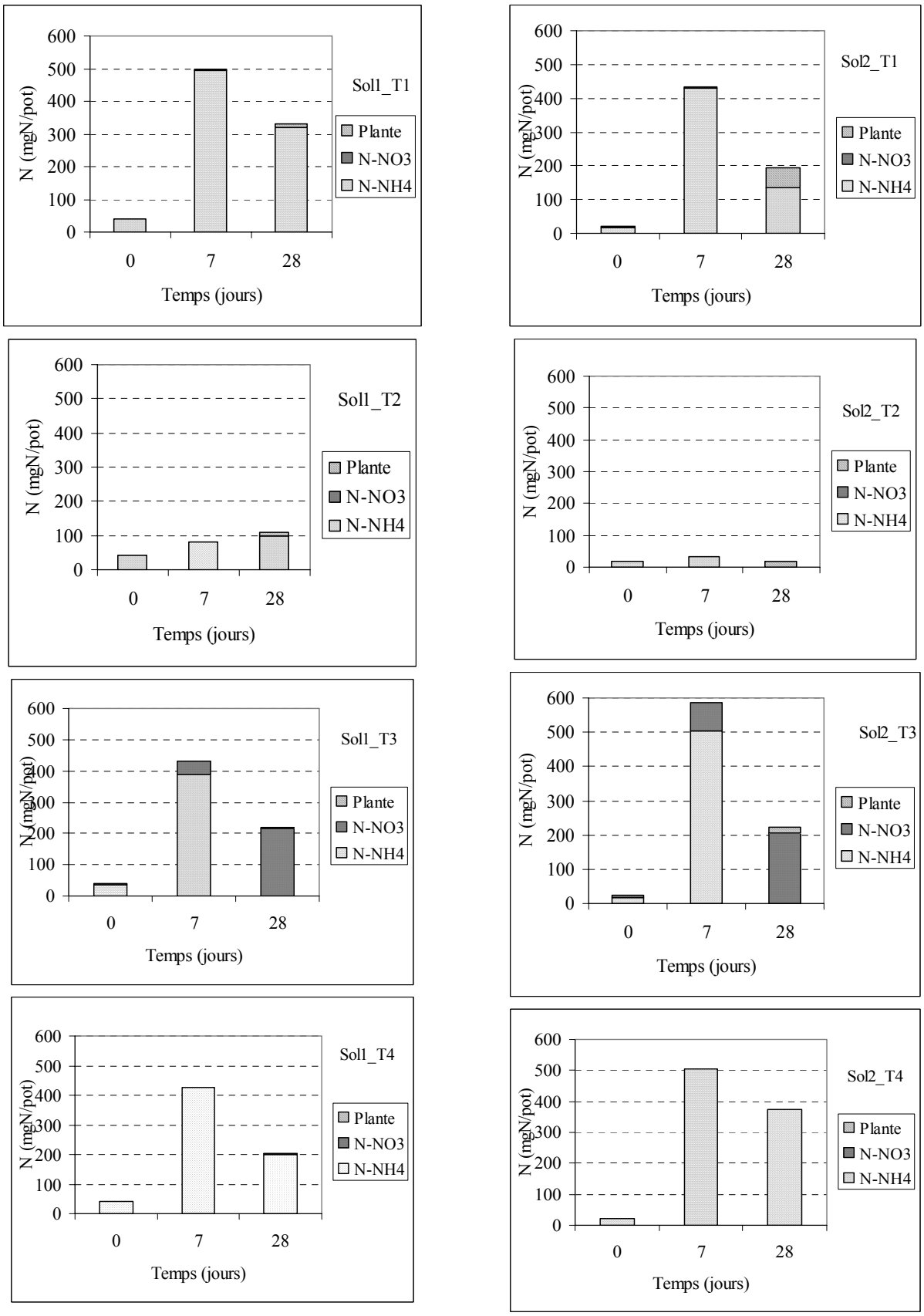


Figure 3. 53 : bilan d'azote dans les pots (Sols1 et 2)

3.3.2.4 Bilans d'azote

En guise de synthèse, les évolutions des stocks d'azote dans les différents compartiments que sont la plante et les formes nitriques et ammoniacales dans le sol et la lame d'eau ont été présentées dans la figure 3. 53. Ils confirment l'existence de pertes importantes d'azote entre le 7ème et le 28ème jour de l'expérimentation.

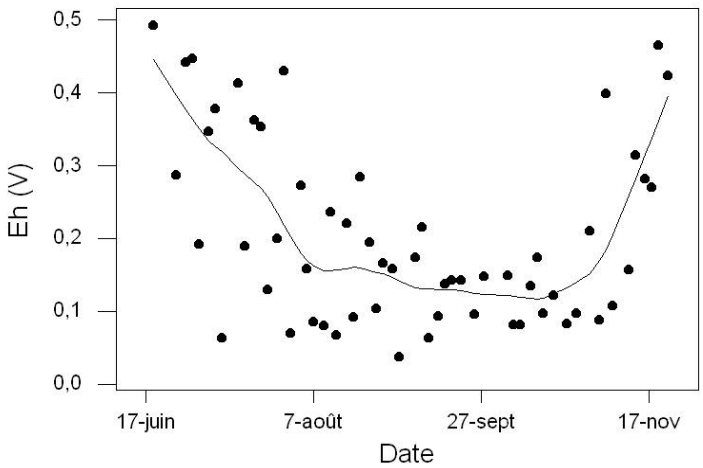


Figure 3. 54 : évolution du potentiel d'oxydoréduction mesuré *in situ* sur le terrain

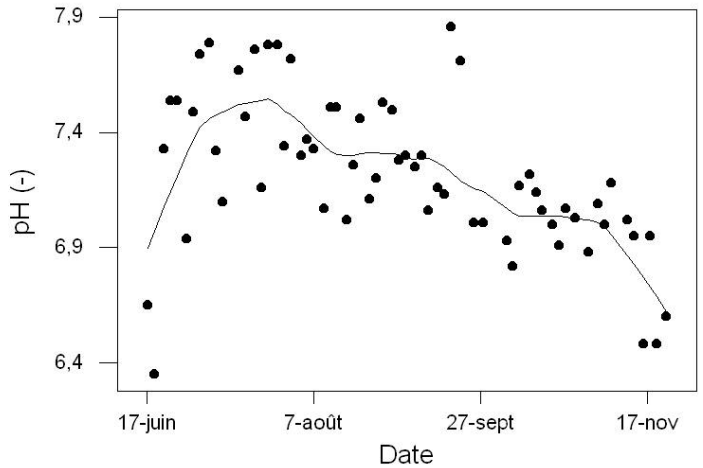


Figure 3. 55 : évolution du pH *in situ* sur le terrain

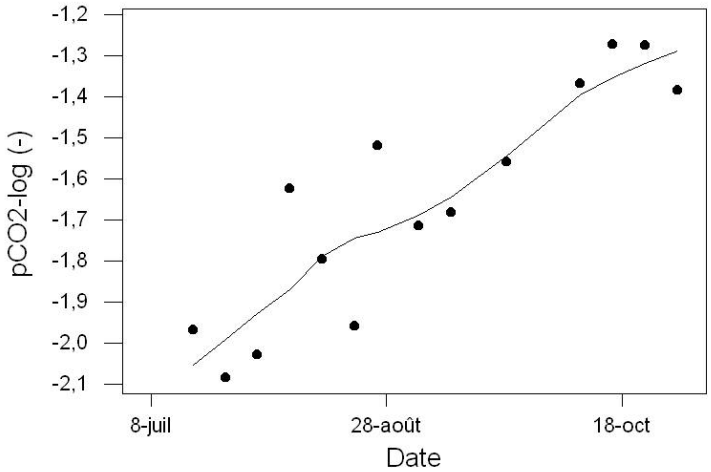


Figure 3. 56 : évolution de la pression partielle de gaz carbonique

3.3.3 Suivi au champ

3.3.3.1 Les états du milieu

Les évolutions des propriétés du sol et de lame d'eau en condition de riziculture irriguée sur sol alcalin à l'Office du Niger sont d'abord caractérisées par une augmentation du pH de la première mise en eau des rizières jusqu'à fin juillet. Le sol est alors progressivement saturé en eau ce qui empêche les échanges gazeux avec l'atmosphère. Il en résulte la mise en place progressive de conditions anaérobies qui se manifestent par une diminution du potentiel redox (figure 3. 54), puis par une accumulation de CO_2 (figure 3. 56) qui entraîne alors une diminution tendancielle du pH (figure 3. 55). Les évolutions de l'alcalinité dans l'horizon superficiel du sol et la solution du sol semblent perturbées par le renouvellement régulier de la lame d'eau sous l'effet des pluies, des irrigations et des débordements ou vidanges des bassins d'irrigation (figures 3.57 et 3.58). Avec l'assec de la rizière en fin de cycle, on observe une augmentation brutale du potentiel redox et du pH, suite vraisemblablement à la réoxydation du Fer dans l'horizon de surface.

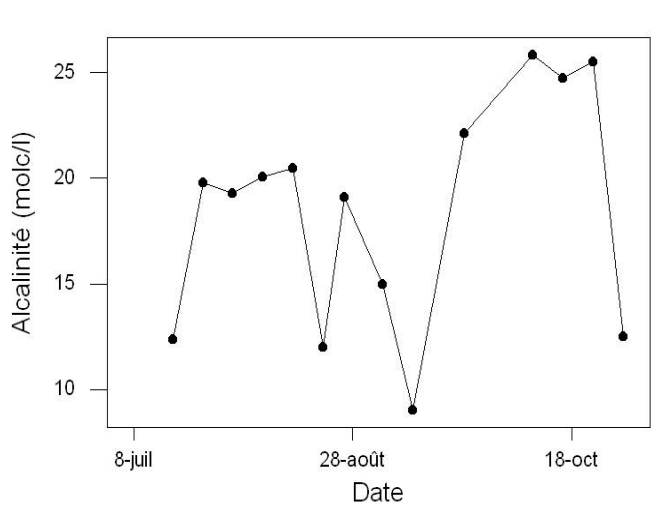


Figure 3. 57 : évolution de l'alcalinité dans le sol mesurée sur le terrain

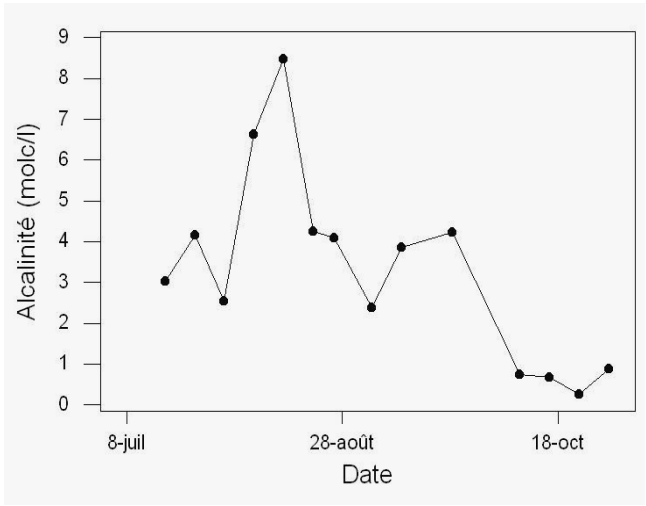


Figure 3. 58 : évolution de l'alcalinité dans la lame d'eau mesurée sur le terrain

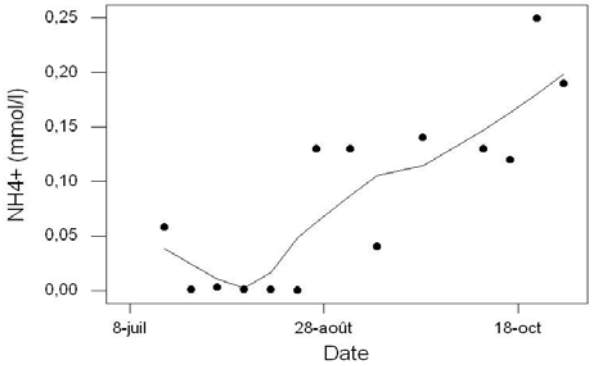


Figure 3. 59 : évolution de la molalité de l'ion ammonium dans la solution du sol sur le terrain

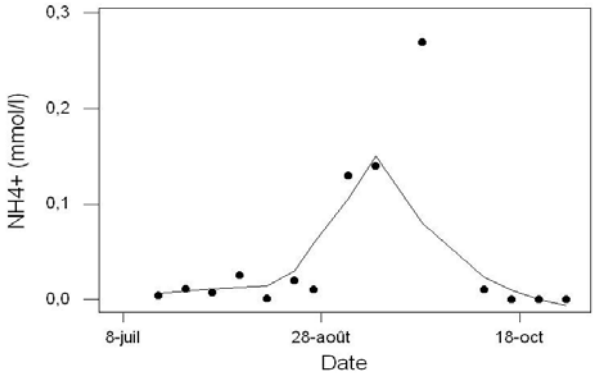


Figure 3. 60 : évolution de la molalité de l'ion ammonium dans la lame d'eau sur le terrain

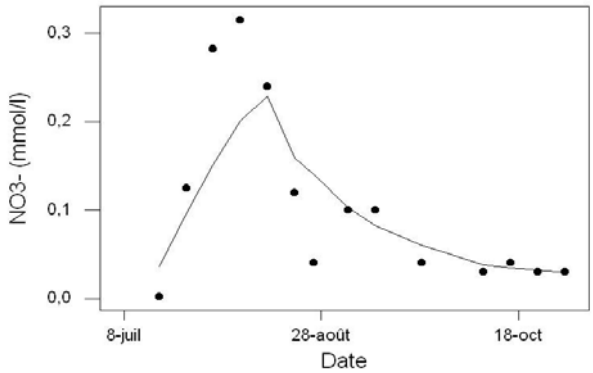


Figure 3. 61 : évolution de la molalité de l'ion nitrate dans la solution du sol sur le terrain

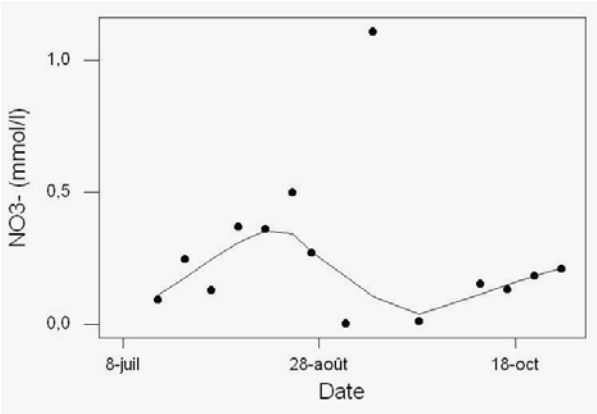


Figure 3. 62 : évolution de la molalité de l'ion nitrate dans la lame d'eau sur le terrain

3.3.3.2 La dynamique de l'azote

En début de cycle, les formes nitriques de l'azote sont dominantes (figures 3.61 et 3.62). La situation s'inverse ensuite suite à l'installation de conditions anaérobies et les formes ammoniacales (figures 3.59 et 3.60) augmentent tandis que les teneurs en nitrate diminuent. Dans la lame d'eau et en surface du sol, les teneurs en ammonium sont faibles en dehors des périodes d'apports d'urée (figure 3. 60).

3.4 Discussion

Les résultats obtenus montrent que les transformations de l'azote apporté sous forme d'urée sont influencées, en condition de riziculture irriguée sous submersion, par les conditions du milieu qu'imposent le pH et le potentiel d'oxydoréduction sous l'influence des propriétés du sol et des modalités de gestion de la lame d'eau superficielle. Ces processus agissent seuls ou en interaction.

3.4.1 Evolution des conditions du milieu

Les sols salés, et plus particulièrement les sols alcalins, sont caractérisés par la présence d'évaporites au premier rang desquels se trouve la calcite. La mise en eau d'un sol sec va provoquer sa dissolution et conduire à une forte augmentation du pH sous l'influence conjointe d'une production d'alcalinité carbonatée et de la consommation de CO_2. Dans un milieu fermé initialement en équilibre avec l'atmosphère, le pH peut s'élever jusqu'à 10.7, principalement sous l'effet d'une diminution très importante de la pression partielle en CO_2 (Appelo & Postma, 1996). En système ouvert ou semi-ouvert, ce phénomène est rapidement compensé par la diffusion de CO_2 ou par l'effet de la dilution de l'alcalinité dans la lame d'eau. Cela explique nos observations réalisées en flacon où on observe une augmentation, puis une décroissance rapide du pH pendant les 24 premières heures de mise en eau.

La mise en équilibre du milieu se réalise ensuite par la dissolution plus lente de calcite mais aussi d'autres minéraux argileux néoformés et l'alcalinité et le pH augmentent faiblement. Par la suite l'activité de la microflore du sol conduit à une augmentation continue de la pression partielle en CO_2 qui ne diffuse pas vers l'atmosphère et s'accumule en présence d'une lame d'eau ; le pH tend

alors à se stabiliser puis à décroître. L'alcalinité produite dans la solution du sol diffuse et le pH de la lame d'eau augmente pour atteindre des valeurs d'autant plus élevées que la pCO_2 est faible à l'interface avec l'atmosphère. En l'absence de lame d'eau, la diffusion du CO_2 vers l'atmosphère favorise une augmentation du pH.

Dans le même temps, la présence d'une lame d'eau conduit à la mise en place progressive de conditions anaérobies. Les conditions deviennent alors défavorables à la nitrification de l'azote, et favorables à la réduction du nitrate et des éléments métalliques comme le Fer et le Manganèse. Ce dernier processus s'accompagne d'une production d'alcalinité dans la solution du sol. A l'inverse, suite à la vidange des bassins rizicoles, l'oxydation de ces éléments s'accompagne d'une consommation d'alcalinité et le pH diminue.

Par opposition aux conditions expérimentales mises en œuvre en milieu contrôlé (flacons ou pots de culture), les bassins rizicoles sont soumis aux irrigations, aux pluies et aux vidanges qui renouvellent la lame d'eau et influencent la composition de la solution du sol. Si les conditions de pH et de potentiel redox peuvent rapidement atteindre des valeurs extrêmes en milieu fermé, les évolutions au champ apparaissent beaucoup plus limitées.

3.4.2 Hydrolyse de l'urée

Les différents résultats obtenus montrent que l'hydrolyse de l'urée débute dès les premières heures après l'apport, et est pour l'essentiel achevée 3 jours après l'apport d'engrais notamment sur le sol modérément alcalin. Ce phénomène s'accompagne d'une production d'alcalinité carbonatée et d'une consommation de CO_2 qui conduit à une augmentation modérée du pH de la solution du sol et de la lame d'eau. L'ammonium produit est alors principalement adsorbé sur le complexe d'échange cationique, mais peut aussi diffuser dans la lame d'eau superficielle, se dissocier en azote ammoniacal, ou être transformé en azote nitrique par nitrification. En présence d'une lame d'eau et avec la mise en place de conditions anaérobies, l'ammonium reste alors la principale forme d'azote minéral dans les sols. L'hydrolyse de l'urée est systématiquement apparue plus rapide sur le sol 2 peu alcalin et pourrait indiquer que l'activité enzymatique est partiellement inhibée par de fortes valeurs de pH.

3.4.3 Volatilisation d'ammoniac

La volatilisation d'ammoniac est d'abord la conséquence de la présence d'ammoniac NH_3 en phase aqueuse en équilibre avec le pH et l'ion ammonium, issu notamment de l'hydrolyse de l'urée. En l'absence de mesures directes, le risque de volatilisation a pu être estimé par le calcul de la pNH_3. La volatilisation est aussi influencée par la température et le vent en condition naturelle, mais les conditions des flacons fermés et "thermostatés" ne permettent pas d'aborder ces facteurs.

Les pertes les plus importantes ont été observées sur le sol le plus alcalin (sol 1), et en présence d'une lame d'eau probablement en relation avec une hydrolyse moins rapide de l'urée sur ce sol. En condition de pH élevé, l'azote ammoniacal contenu dans la lame d'eau est soumis à un régime élevé de volatilisation qui semble se maintenir jusqu'au moins 2 semaines après l'apport d'urée. Les pertes peuvent représenter jusqu'à 25% de l'urée apportée sur sol alcalin et seulement 10% sur sol modérément alcalin. Ce phénomène est alimenté par la diffusion d'azote ammoniacal et contrarié simultanément par son adsorption sur le complexe d'échange cationique.

En l'absence de lame d'eau, le pH du sol est plus élevé mais reste généralement inférieur à celui mesuré dans la lame d'eau superficielle. Le flux initial de volatilisation d'ammoniac est plus faible. Par la suite, le flux de volatilisation décroît fortement sous l'influence de la transformation des formes d'azote ammoniacal par nitrification.

La volatilisation d'ammoniac n'a pas pu être mesurée en condition de culture en pot, ni sur le terrain. Dans les pots, les valeurs de pNH_3 calculées sont plus faibles que celles mesurées dans les flacons au laboratoire. Cela tient vraisemblablement à l'apport de doses d'urée plus faibles par rapport aux quantités de sol, et ce malgré des valeurs de pH très élevées. En condition de culture au champ, les concentrations en azote ammoniacal et les pH mesurés dans la lame d'eau sont le plus souvent inférieurs aux valeurs mesurées au laboratoire et laissent à penser que les pertes par volatilisation restent limitées.

3.4.4 Nitrification et dénitrification

La nitrification des formes d'azote ammoniacal ne se produit que lorsque les conditions d'aération le permettent. En conditions réductrices, les formes

nitriques de l'azote sont négligeables notamment en l'absence de lame d'eau. Dans ce cas, l'azote nitrique représente près de la moitié de l'azote minéral à l'issue de l'expérimentation. C'est le cas en condition contrôlée au laboratoire où les conditions anaérobies se mettent en place dès les premiers jours d'expérimentation, et sur le terrain environ 1 mois après la mise en eau des rizières.

Lorsque les conditions le permettent, en l'absence de lame d'eau en condition contrôlée ou dans le premier mois de culture au champ, la plus grosse partie de l'azote est nitrifiée au bout de 2 semaines environ, suite à l'hydrolyse de l'urée. Les formes d'azote nitrique apparaissent ensuite très sensibles à la dénitrification dans un sol engorgé, proche de la saturation. Dans les sols submergés, ces processus de nitrification et dénitrification semblent pouvoir se produire au niveau d'une mince lame de sol oxydé au contact de la lame d'eau.

Bien qu'il n'ait pas été directement mesuré, ce processus de dénitrification semble induire des pertes d'azote sensiblement plus importantes que celle liées à la volatilisation d'ammoniac. Sa présence a d'ailleurs été mise en évidence dans les conditions de riziculture irriguée, mais son ampleur est diversement analysée par les auteurs. Dans tous les cas, les pertes engendrées restent sensiblement plus faibles que celles évaluées en l'absence de lame d'eau.

3.4.5 Interactions entre le sol et la plante

Nous ne sommes pas parvenus à mettre en évidence d'influence significative de la plante sur l'évolution des conditions du milieu ou la dynamique de l'azote. La seule exception porte sur une diminution de la quantité d'azote ammoniacal au profit de l'azote nitrique dans la lame d'eau. La capacité de la plante à transporter de l'oxygène vers ses racines pourrait contribuer à stimuler le processus de nitrification et dénitrification dans les sols submergés. Cela a d'ailleurs été mis en évidence par les auteurs (Reddy et al, 1989 ; Inko et al, 1998). L'incidence éventuelle de ce mécanisme n'est pas apparue dans les bilans d'azote réalisés.

A l'inverse, la croissance du riz est apparue fortement influencée par les conditions du milieu indépendamment d'une fourniture satisfaisante en azote minéral. En conditions très alcalines, les plants de riz ont tous séchés avant la fin de l'expérimentation. En conditions moins alcalines, la production de matière

sèche a été pénalisée par l'absence de lame d'eau et l'augmentation consécutive du pH. Ces observations pourraient expliquer l'aversion des paysans de l'Office du Niger pour la pratique d'assec au cours de la saison de culture, et notamment lors de l'apport d'urée.

3.5 Conclusion

A la lumière des résultats obtenus, il apparaît que la lame d'eau joue un ensemble de fonctions qui interagissent avec le type de sol pour déterminer la dynamique de l'azote en condition de riziculture irriguée sur sols alcalins. Elle joue d'abord un rôle sur le pH en maintenant des valeurs acceptables pour le riz dans de telles conditions alcalines. Elle intervient ensuite pour favoriser les pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac lors de l'apport d'urée dans la lame d'eau, plus particulièrement sur sols alcalins. En l'absence de lame d'eau, les pertes par volatilisation d'ammonium restent faibles, notamment en raison de la transformation de l'azote ammoniacal par nitrification. Les formes nitriques sont cependant soumises à un processus de dénitrification susceptible d'entraîner des pertes plus élevées que celles liées à la volatilisation de NH_3.

Au bilan, il semble que les pratiques paysannes tiennent davantage à une réduction du risque que la plante soit affectée par des valeurs élevées du pH, mais sans influence notable sur la dynamique de l'azote. L'accroissement consécutif des pertes d'azote par volatilisation reste modéré et de moindre importance que les pertes d'azote par dénitrification qui résulterait d'une disparition prolongée de la lame d'eau. Un assec de courte durée pourrait représenter une solution optimale à la condition que l'agriculteur puisse assurer avec une sécurité suffisante la remise en eau de sa parcelle dans un bref délai. Ce qui expliquerait le niveau des rendements plus élevé dans les parcelles du groupe S3 qui bien que modérément alcalin ont quand même eu une meilleure gestion de la lame d'eau contrairement au groupes S1 et S4 où la gestion de l'eau associée à une mauvaise gestion de l'azote, a favorisé les faibles rendements de ces parcelles.

Chapitre 4 : Etude en station de l'effet de la lame d'eau, des apports d'azote et de l'âge des plants sur l'efficience de l'azote en riziculture irriguée.

Chapitre 4 : Etude expérimentale au champ de l'effet de la gestion de la lame d'eau, des apports d'azote et de l'âge des plants sur l'efficience de l'azote en riziculture irriguée.

4.1 Introduction

Lors de la première étape des travaux (chapitre 2), le diagnostic agronomique effectué en milieu paysan a révélé une forte variabilité des rendements obtenus et des pratiques agricoles. Il met aussi en évidence l'existence de facteurs défavorables à une efficience optimale de l'apport d'engrais azoté. Les engrais azoté sont apportés à des dates qui ne coïncident pas toujours avec les stades clés de la croissance du riz et à des doses insuffisantes pour permettre au riz d'atteindre son potentiel. Le repiquage est souvent réalisé avec des plants beaucoup plus âgés que les recommandations en vigueur. Les rendements apparaissent principalement affectés dans les situations où le contrôle de la lame d'eau est insuffisant (absence de lame d'eau au moment ou pendant plusieurs jours après un apport d'azote ou absence de lame d'eau au moment de l'initiation paniculaire) ou lorsque les propriétés du sol sont dégradées, résultant d'un processus d'alcalinisation des sols sous l'influence de la qualité des eaux d'irrigation et se manifestant notamment par des pH élevés parfois proche de 9. Globalement, ni les conditions de sol ni les pratiques, malgré leur forte variabilité, n'ont permis d'expliquer la variabilité observée des rendements.
La seconde étape du travail aura porté sur l'étude *in vitro* des différents mécanismes et facteurs déterminant la dynamique de l'azote suite à un apport d'urée (chapitre 3). Les pratiques paysannes d'apport d'urée dans la lame d'eau conduisent à un accroissement du risque de volatilisation d'ammoniac. Ces pertes restent cependant modérées sur sols alcalins (inférieures à 25%), et faibles sur sols non alcalins (inférieures à 10%). Le risque principal de perte d'azote semble plutôt résulter d'un processus de nitrification et dénitrification de l'azote ammoniacal lorsque les conditions d'oxydoréduction du milieu le permettent, en début de cycle ou suite à un assec prolongé. Ces pertes sont plus élevées sur sols non alcalins en relation avec une activité plus importante de la microflore pour l'hydrolyse de l'urée, puis la nitrification et la dénitrification. Les sols alcalins seraient donc moins sensibles au risque de dénitrification.

Des questions subsistent néanmoins quant à l'influence de l'âge des plants au repiquage, des modalités conjointes de gestion de la lame d'eau et de la fertilisation azotée, et de l'état de dégradation du sol, à la fois sur l'efficience de la fertilisation azotée et les facteurs d'élaboration du rendement du riz au champ. Deux expérimentations ont donc été mises en place au champ pour étudier l'influence de ces différents facteurs selon des calendriers maîtrisés permettant une bonne adéquation des apports d'urée avec les besoins de la plante et susceptible d'assurer une bonne efficience de la fertilisation azotée (Peng & Cassman, 1998; Kirk & Kronzucker, 2000).

La première expérimentation porte sur l'influence de la gestion de la lame d'eau en interaction avec le calendrier de fertilisation azotée. Nous avons comparé les pratiques paysannes d'apport de l'urée dans la lame d'eau avec les recommandations correspondant à la vidange du casier rizicole avant l'apport d'urée, puis sa remise en eau après quelques jours. Les hypothèses abordées quant aux comportements des paysans de la zone concerneront à la fois l'influence de ces pratiques sur l'efficience de la fertilisation azotée et les facteurs d'élaboration du rendement. Deux modalités de gestion de calendrier de fertilisation azotée sont abordées sous la forme d'un fractionnement en deux apports : à la reprise et à l'initiation paniculaire, ou en trois apports : à la reprise, à l'initiation paniculaire et à début épiaison.

La seconde expérimentation porte sur l'influence de l'age des plants au repiquage en interaction avec les pratiques de fertilisation azotée. Trois groupes d'âge de plants ont été identifiés lors du diagnostic agronomique : des plants de 20 à 30 jours, entre 30 et 45 jours et des plants de plus de 45 jours. Ces derniers ont cependant produit des rendements équivalents à ceux obtenus avec les deux premiers groupes. Il faut souligner que le repiquage de plants d'âge supérieur à 45 jours est peu fréquent et souvent lié à des contraintes au niveau de l'exploitation tandis que le repiquage des plants de 30 à 45 jours est une pratique courante dans la zone. Le repiquage entre 21 et 30 jours correspond aux recommandations faites par la recherche agronomique et l'Office du Niger. Les études menées à l'ADRAO (Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest) recommandent le repiquage de plants jeunes (3 – 4 feuilles) après un séjour de 21 jours en pépinière (Dingkuhn *et al.*, 1995). A partir de ces travaux, on peut supposer que

les plants âgés présentent de moindres aptitudes à la reprise, au tallage et par voie de conséquence, une médiocre utilisation de l'azote. L'expérimentation est complétée par un traitement pour lesquels un seul apport d'azote est fait à l'initiation paniculaire, afin de laisser s'exprimer ces conditions de stress post repiquage liées à l'âge des plants.

L'effet du sol et de ses interactions avec les traitements mis en oeuvre est pris en compte par l'installation simultanée des deux essais sur deux situations pédologiques contrastées sur sols alcalins, et sur sols non alcalins.

4.2 Matériel et méthode

4.2.1 Sol et dispositifs expérimentaux

Les expérimentations ont été réalisées sur deux sols de niveaux de pH différents, à la station de recherche agronomique de Niono.

- Sol1 : faiblement alcalin avec un pH moyen de 6,5
- Sol2 : alcalin avec un pH moyen de 8,2.

Deux essais factoriels en bloc de Fisher (à quatre blocs) ont été mis en place sur chaque sol pour l'étude de : (i) l'effet de la gestion de la lame d'eau et de la fertilisation azotée (essai 1) ; (ii) l'effet de la gestion de l'azote et de l'âge des plants au repiquage (essai 2). Des canaux indépendants ont été aménagés pour l'irrigation et le drainage de façon à assurer des conditions optimales de maîtrise de la lame d'eau. Chaque traitement est installé dans une parcelle de 30m^2 (5mX6m), entourée par une diguette de 50cm d'épaisseur et 50cm de hauteur pour assurer l'indépendance des traitements pour la fertilisation azotée.

4.2.2 Conduite des essais

La préparation du sol a consisté en un labour suivi d'une mise en boue et d'un planage sur chaque parcelle. Le riz est repiqué aux stades 3 à 4 feuilles pour les plants jeunes et à début tallage pour les plants âgés, à raison de deux plants par poquet et aux écartements de 20cm x 20cm. Sur chaque parcelle l'engrais est apporté à partir de la reprise. Le phosphore (20 kgP/ha sous forme de DAP) et le potassium (31kgK/ha sous forme de KCl) ont été apportés à la reprise sur l'ensemble des traitements. L'azote est apporté sous forme d'urée en fonction des traitements. Le désherbage manuel est effectué avant chaque apport et au besoin en fonction de l'état d'enherbement.

Tableau 4.10 : tableau des traitements utilisés ; la lame d'eau est gérée différemment seulement lors des apports d'azote.

Gestion de l'azote / Gestion de la lame d'eau		Sans azote	Azote à reprise+IP 45+75 (kgN/ha)	Azote à reprise+IP+épiaison 40+60+20 (kgN/ha)
		N0	N1	N2
Lame d'eau	L1	L1N0	L1N1	L1N2
Sans lame d'eau (assec)	L2	L2N0	L2N1	L2N2

Tableau 4.11 : tableau des traitements utilisés ; l'azote est apporté dans une lame d'eau pour tous les traitements.

Gestion de l'azote / Gestion du repiquage		Sans azote	45+75 (kgN/ha) Azote à reprise+IP	(75kgN/ha) Azote à IP seulement
		N0	N1	N3
Plants jeunes (30 jours)	A1	A1N0	A1N1	A1N3
Plants âgés (45 jours)	A2	A2N0	A2N1	A2N3

4.2.2.1 Essai 1

L'objectif de cet essai est de comparer l'impact de deux modalités de gestion de la lame d'eau au moment des apports d'engrais et selon trois modalités de gestion de l'azote. On étudie également les interactions entre ces deux facteurs et avec le sol, l'essai étant répété sur les sols 1 et 2. Les modalités d'apport de l'azote sont les suivantes :

1. Apport de l'azote dans une lame d'eau correspondant à la pratique paysanne dans la zone ou bien avec vidange de la parcelle avant l'apport de l'urée sur un sol en boue. Une lame d'eau est rétablie trois jours après l'apport.
2. Apports d'azote en deux (reprise et initiation paniculaire) ou trois fois (reprise, initiation paniculaire et début épiaison) comparés à un témoin sans apport d'azote.

Le tableau 4.10 résume les traitements mis en place.

4.2.2.2 Essai 2.

L'objectif est d'évaluer l'impact de l'âge des plants au repiquage et les modalités d'apport des engrais sur l'absorption de l'azote sur deux sols contrastés. Nous avons choisi de comparer les performances des deux types de plants à savoir la pratique observée dans certaines parcelles paysannes qui concerne des plants en phase de tallage, repiqués 45 jours après semis et celle recommandée pour la zone avec des plants de trois à quatre feuilles repiqués à 30 jours après semis (Tableau 4.11).

4.2.2.3 Mesures et observations

Pour chaque parcelle élémentaire, un échantillon de sol composite a été prélevé sur la profondeur 0-30 cm pour la mesure du pH dans un rapport sol /eau de 1 /2,5 (poids de sol/ poids d'eau) au laboratoire. Cet échantillon est obtenu à partir des prélèvements effectués à cinq endroits différents de la parcelle (les quatre angles et le milieu de la parcelle).

Dans chaque parcelle, dix touffes de riz ont été prélevées sur une surface correspondant à 0,4m^2 avant chaque apport d'engrais, 15 jours après l'apport et à la maturité. Les échantillons sont pesés puis broyés et analysés pour la

détermination des teneurs en azote total en se basant sur la méthode Dumas (Edeling, 1968) par le laboratoire d'analyse du CIRAD. Les plants ont été prélevés sur deux rangées contiguës et ne présentant pas d'effet de bordure.

A la maturité les composantes du rendement (nombre de tiges, nombre de panicules, poids de paille, poids de grains pleins et vides, poids de 1000 grains) ont été déterminées sur dix touffes (0,4 m^2) prélevées dans les mêmes conditions qu'à l'occasion des apports d'azote d'après une méthode proposée par (Dobermann & Fairhust, 2000). Le taux d'humidité du grain a été déterminé au moment des pesées. Les échantillons ont été séchés dans une étuve à 60°C pendant trois jours puis pesés, broyés et analysés pour déterminer les teneurs en azote total au CIRAD par la méthode Dumas.

4.2.3 Traitement des données

Nous avons d'abord caractérisé l'état de nutrition azotée des plantes, après l'analyse du rendement et de ses composantes. A partir de la détermination des matières sèches et teneurs en azote des plants, un indice de nutrition azotée (INN) (Lemaire & Gastal, 1998), a été calculé pour chaque stade de croissance. Il correspond au rapport entre la teneur en azote de la plante et la teneur critique calculée sur la base de la matière sèche aérienne d'après la relation suivante (Sheehy et al, 1998) :

$$Nc(\%) = a * (Msa)^{-b}$$

Nc : teneur critique en azote

Msa = biomasse aérienne.

Avec a = 5,18 et b = 0,52 (Sheehy et al, 1998)

Dans un deuxième temps nous avons analysé l'efficacité de la fertilisation azotée. D'après Yoshida (1981) l'efficience se définit au plan agronomique par le surplus de rendement généré par l'apport d'azote (kg de grain/kg d'azote apporté_E_N) ou au plan physiologique par le surplus de rendement généré par l'absorption d'azote (kg de grain/kg d'azote absorbé_E_U). On parle d'efficience agronomique ou physiologique selon le cas. Yoshida (1981) utilise un troisième indicateur, le taux de recouvrement de l'azote (TN), qui se définit comme le pourcentage d'azote absorbé par rapport à la quantité d'azote apporté (kg N absorbé/kg N apporté). Il utilise ce paramètre pour calculer l'efficience des engrais azoté.

$$E_N(kgpaddy/kgNappliqué) = TN * EU(kgpaddy/kgNabsorbé)$$

Ce calcul ne fait pas la part de l'azote apporté par le sol. En estimant que la prise en compte de cet apport est nécessaire pour l'évaluation de l'efficacité de la fertilisation azotée, nous utilisons la notion de coefficient apparent d'utilisation des apports d'azote (CAU) proposée par Meynard (1997). Il consiste à calculer le surplus d'azote prélevé par rapport à un témoin sans azote. On retiendra que le CAU présente l'inconvénient de considérer la contribution du sol comme uniforme avec ou sans apport d'azote minéral. Pour calculer le coefficient réel d'utilisation de l'azote il est nécessaire d'utiliser un engrais marqué à l'azote ^{15}N.

Sur chaque essai nous avons réalisé une analyse de variance sur les différentes composantes du rendement et les autres variables calculées comme l'INN et le CAU. Cette analyse a permis de comparer les moyennes des différents traitements. Les résultats obtenus sur chaque situation ou type de sol ont finalement été comparés pour mettre en évidence l'effet du sol et son pH sur ces différentes variables.

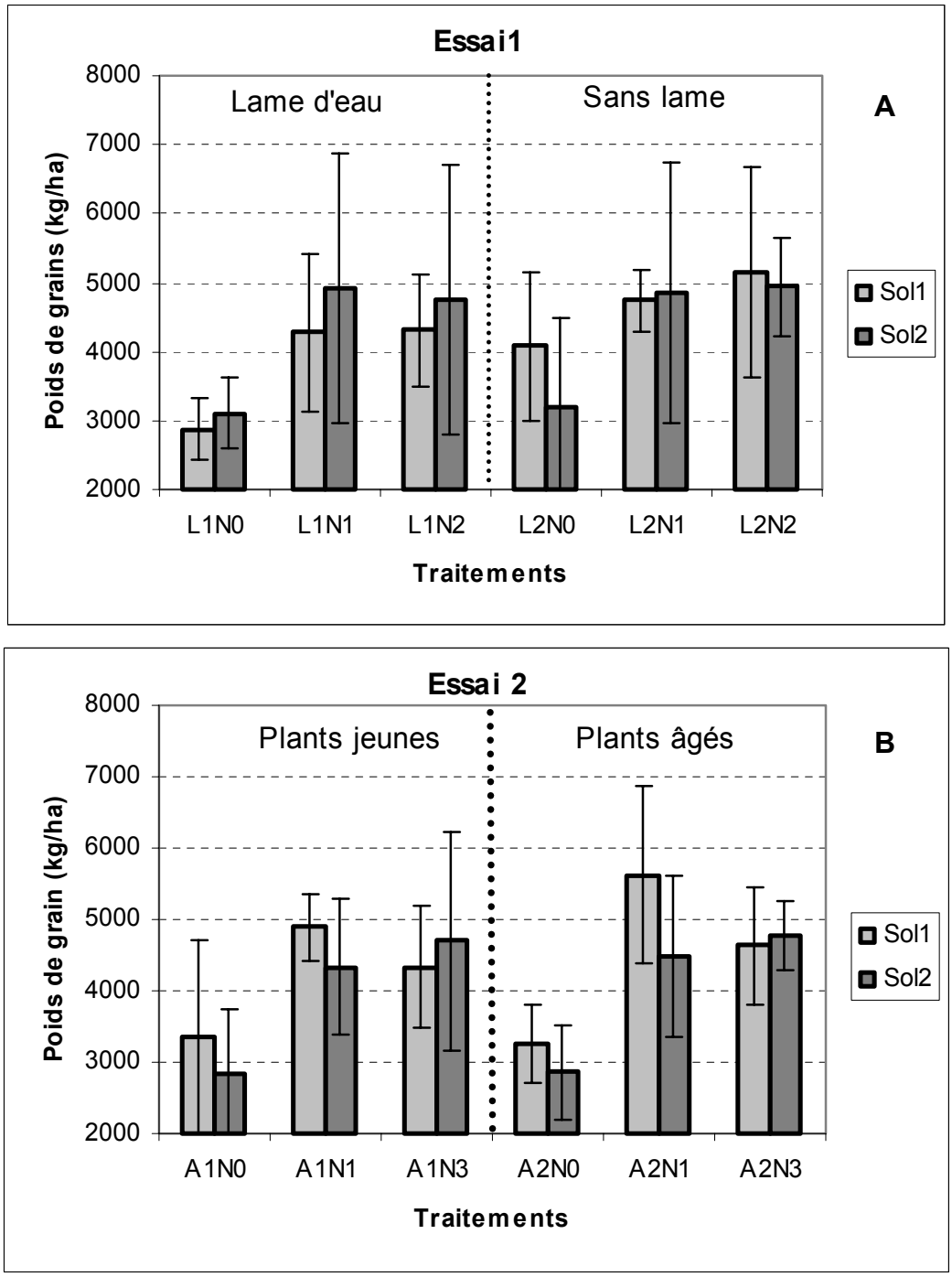


Figure 4.63 : production de grains sur les deux sols. (A) = en fonction de la gestion de la lame d'eau ; (B) = en fonction de l'âge des plants au repiquage.

4.3 Résultats

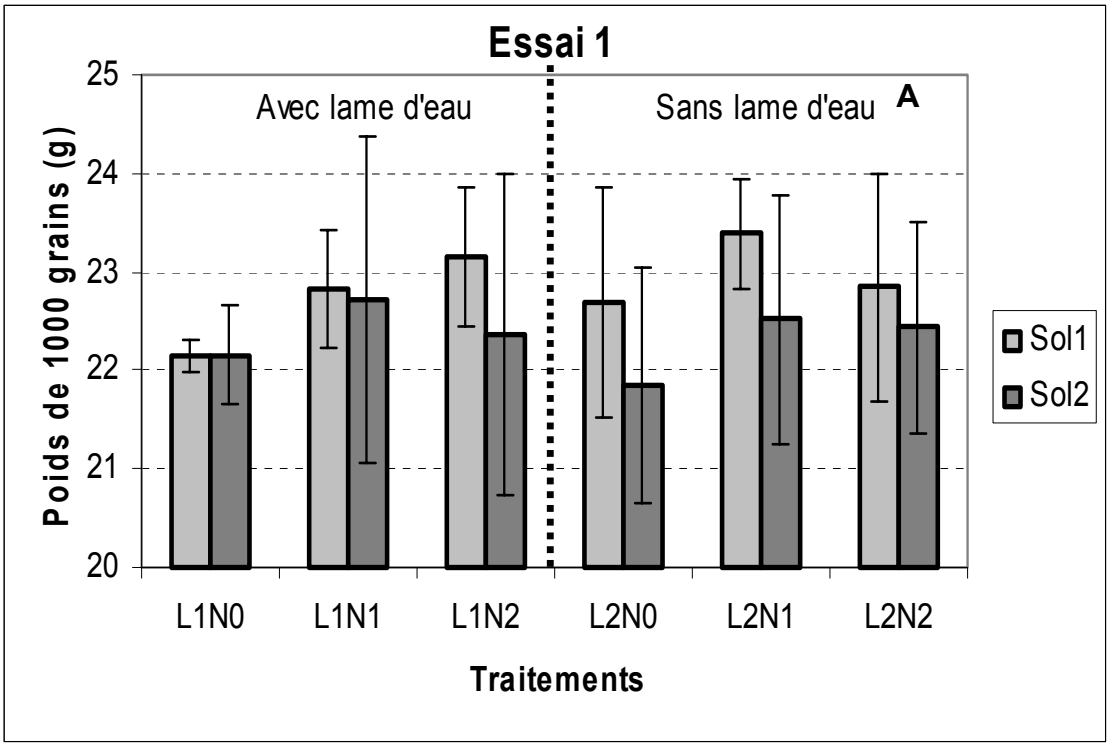
4.3.1 Analyse du rendement et de ses composantes

4.3.1.1 La production de grains : rendement

Pour l'essai 1, l'effet des traitements est significatif au seuil de 10% pour les deux situations étudiées (sol 1 et sol 2). La comparaison des moyennes deux à deux ne montre aucune différence significative. On observe cependant un net effet favorable de la fertilisation azotée sur le rendement qui passe d'environ 3 t/ha de paddy à 4 à 5 t/ha. Le fractionnement de l'azote n'apporte aucune amélioration appréciable. L'effet d'un assec lors de l'apport d'engrais conduit à l'amélioration du rendement moyen sur sol non alcalin.

Pour l'essai 2, l'effet des traitements est significatif au seuil de 5% pour les deux situations étudiées (sol 1 et sol 2). Seule la comparaison des traitements A2N0 et A2N1 montre une différence significative au seuil de 5% pour l'effet de la fertilisation sur le rendement dans le cas d'un repiquage de plants âgés ; cela illustre l'augmentation du rendement observée sur tous les traitements en réponse à une fertilisation azotée. On pourra aussi relever que les plants âgés obtiennent systématiquement des rendements plus élevés dans le cas d'un apport d'engrais ; ces différences ne sont pas significatives.

Il n'existe aucune relation significative entre le rendement et le pH, même si le rendement semble décroître légèrement sur les sols les plus alcalins.



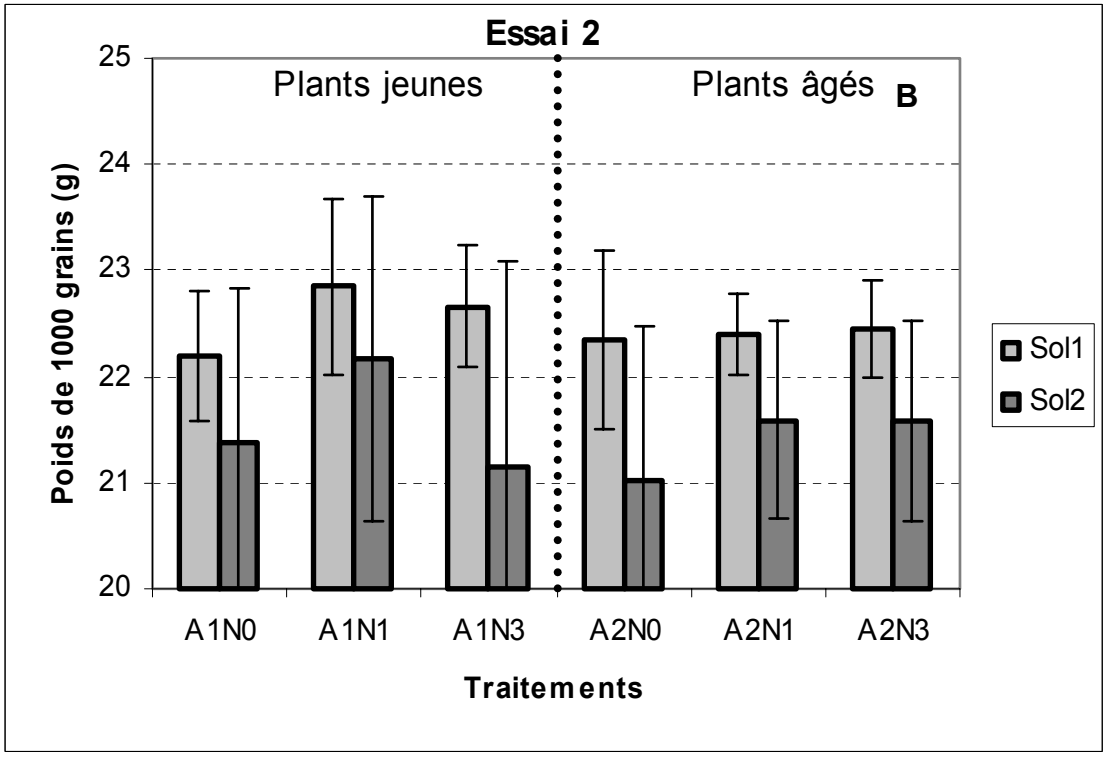


Figure 4.64 : influence de la gestion de la lame d'eau (A), de l'âge des plants au repiquage (B) et du fractionnement d'azote sur le poids de 1000 grains.

4.3.1.2 Poids de mille grains (PMG)

Cette variable renseigne sur les conditions de remplissage des grains après la floraison. L'effet des traitements n'est pas significatif, ni sur l'essai 1, ni sur l'essai 2. La comparaison des moyennes deux à deux ne montre aucune différence significative. On pourra quand même relever un effet favorable de la fertilisation azotée sur tous les traitements et un effet favorable de l'assec lors des apports d'engrais sur le sol non alcalin (sol 1). L'effet de l'age des plants au repiquage n'est pas significatif même si le rendement moyen semble légèrement inférieur avec les plants âgés.

Le principal résultat est l'existence d'une corrélation négative significative au seuil de 1% entre le poids de 1000 grains et le pH du sol (fig. 4.65). Les valeurs obtenues sur le sol alcalin (sol 2) sont systématiquement inférieures pour les essais 1 et 2.

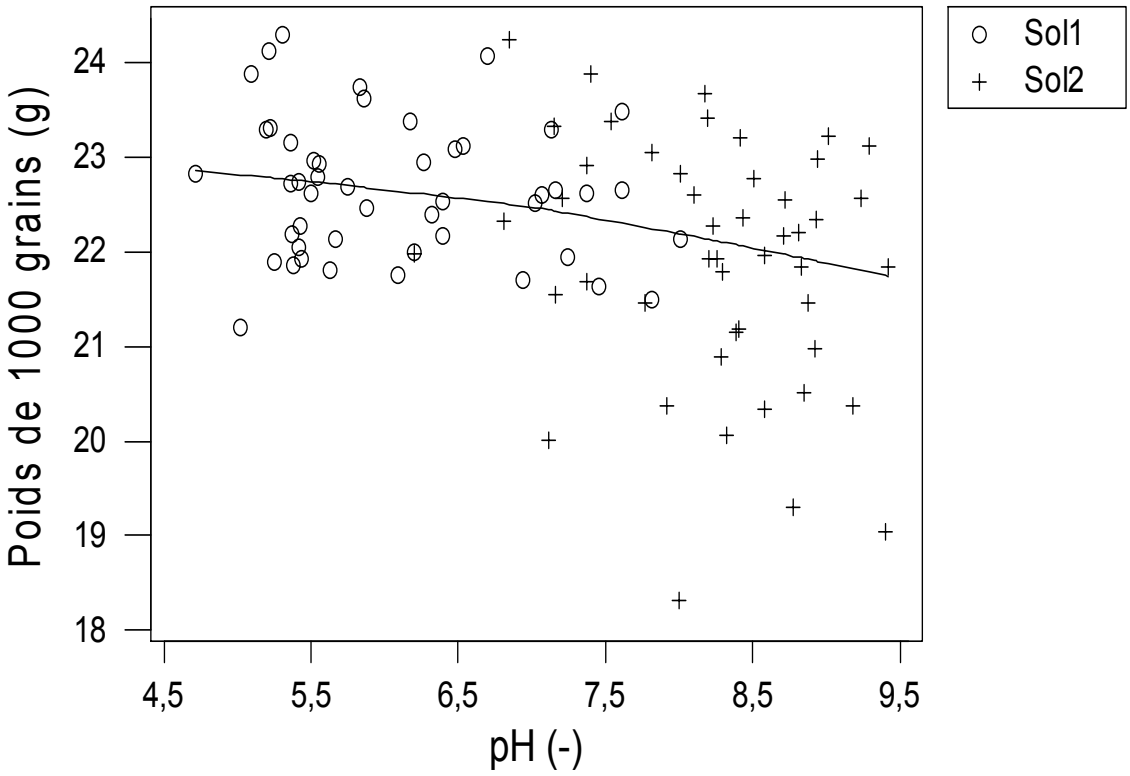
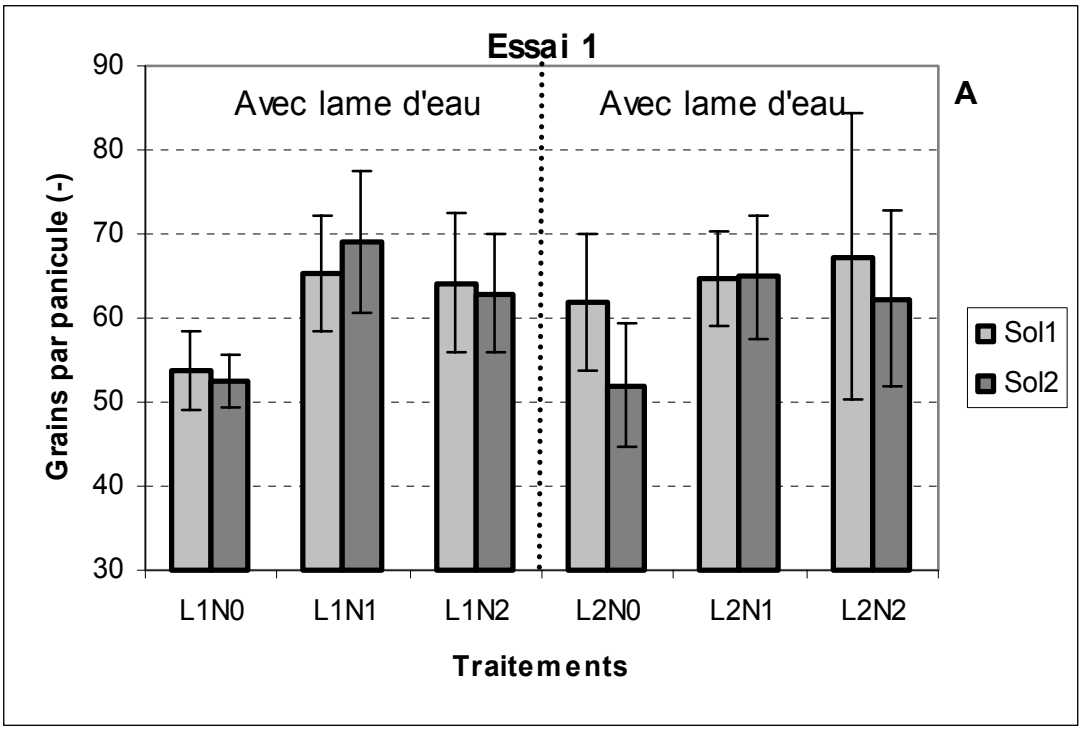


Figure 4.65 : influence du pH sur le poids de mille grains.



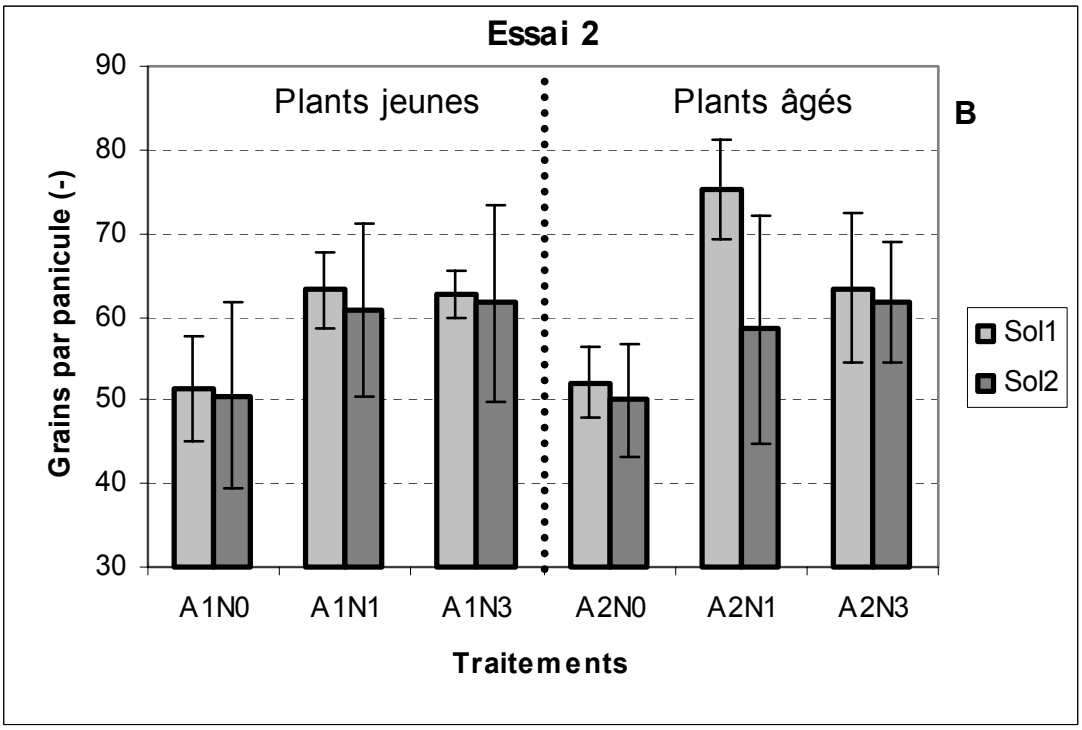


Figure 4.66 : nombre d'épillets pleins en fonction des traitements (A) =gestion de la lame d'eau et (B) = âge des plants au repiquage sur les deux sols.

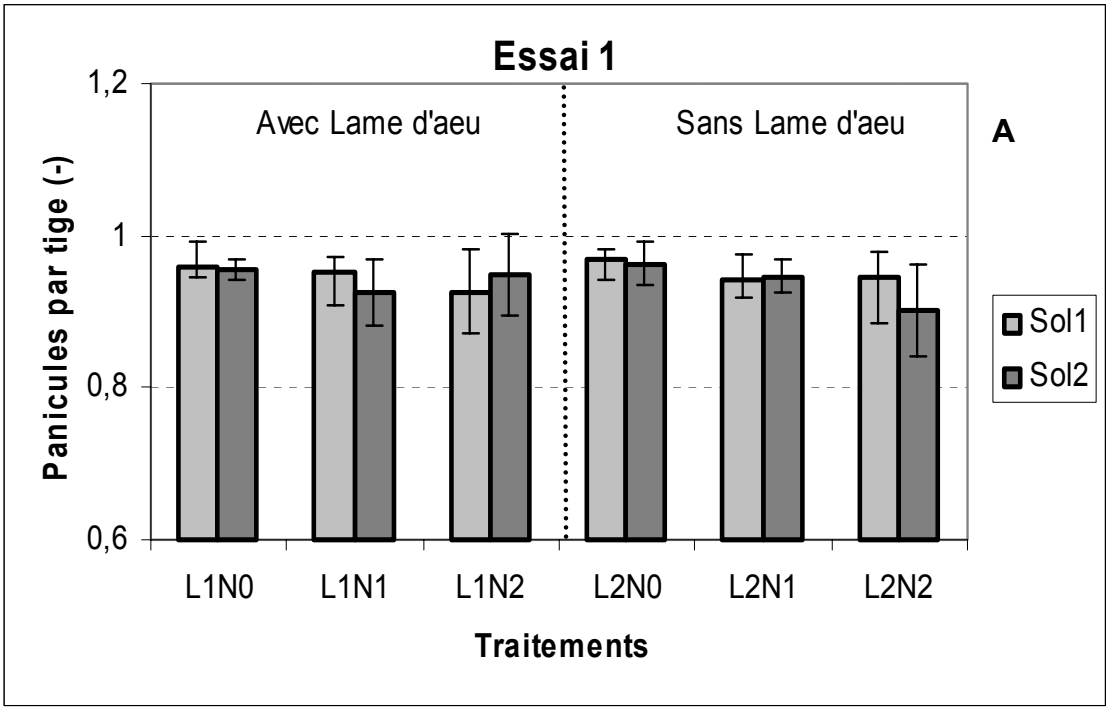
4.3.1.3 Nombre de grains par panicule (NGP)

Cette variable renseigne sur les conditions de croissance pendant le développement des panicules et la floraison (figure 4.66)

Pour l'essai 1, l'effet des traitements n'est pas significatif sur le sol non alcalin (sol1). Sur le sol alcalin (sol2), l'effet des traitements est significatif au seuil de 5% et la comparaison des traitements L1N0 et L1N1 met en évidence un effet significatif au seuil de 5% de la fertilisation azotée en l'absence d'une lame d'eau. La fertilisation azotée s'accompagne néanmoins d'une augmentation systématique du rendement moyen, tandis que la gestion de la lame d'eau ne conduit à aucune différence appréciable entre les différents traitements.

Pour l'essai 2, l'effet des traitements n'est pas significatif sur le sol alcalin (sol2). Sur le sol non alcalin (sol1), l'effet des traitements est très significatif (seuil de 0.1%) et la comparaison des moyennes deux à deux met en évidence des effets favorables significatifs de la fertilisation azotée (A1N1 supérieur à A1N0 au seuil de 10% ; et A2N1 supérieur à A2N0 au seuil de 0.1%) ; et des plants âgés au repiquage (A2N1 supérieur à A1N1 au seuil de 10%). On observe aussi un effet favorable significatif de la fertilisation à la reprise sur les plants âgés (A2N1 supérieur à A2N3 au seuil de 10%).

L'effet défavorable des sols alcalins se manifeste par une corrélation négative significative entre le pH et le nombre de grains par panicule (seuil de 10%).



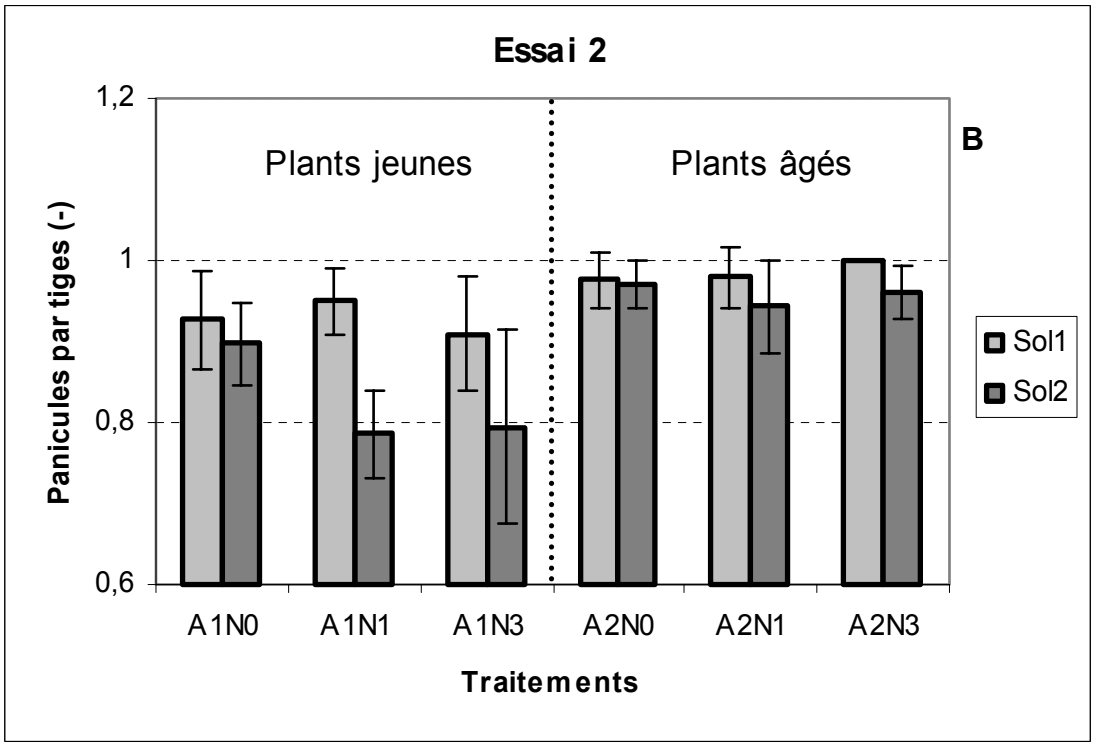


Figure 4.67 : influence des traitements sur l'épiaison. La gestion de la lame d'eau n'a pas d'effet (A) ; effet du sol sur les plants jeunes après apport d'azote (B).

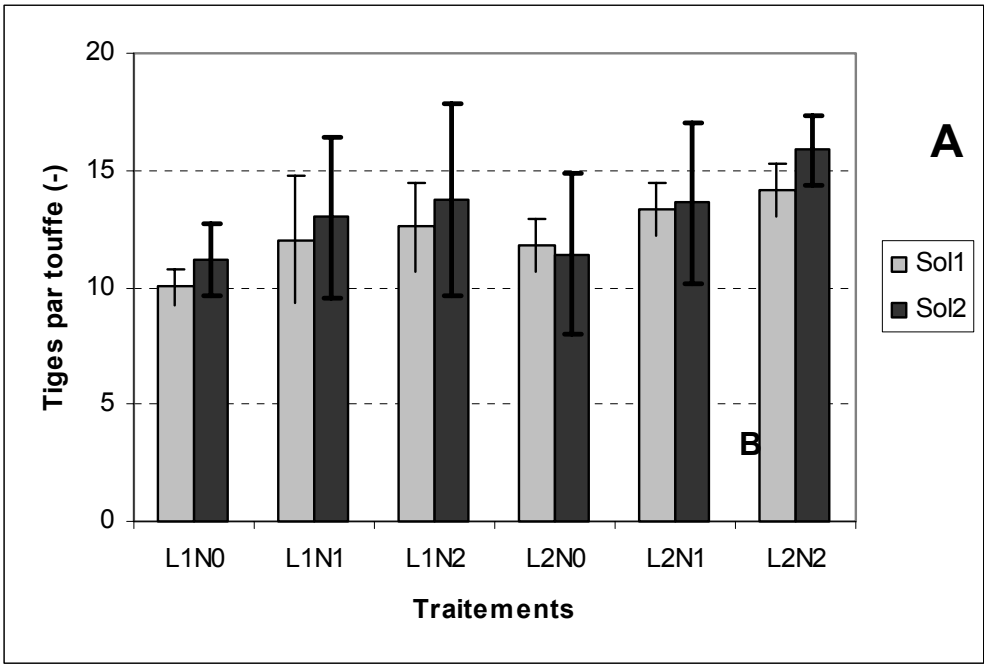
4.3.1.4 Nombre de panicules par tige

Cette variable renseigne sur les conditions de croissance pendant la phase d'initiation paniculaire (figure 4.67).

Pour l'essai 1, on n'observe aucun effet significatif des traitements que cela concerne le sol alcalin (sol2) ou non alcalin (sol1). Même l'effet de la fertilisation azotée n'apporte pas de gain appréciable sur ce facteur.

Pour l'essai 2, aucun effet significatif n'est observé sur le sol non alcalin (sol 1). Sur le sol alcalin (sol 2), l'effet des traitements est très significatif (seuil de 1%). On note tout particulièrement un effet défavorable des plants jeunes au repiquage associés à une fertilisation azotée (A1N1 inférieur à A2N1 et A1N3 inférieur à A2N3 au seuil de 10%).

L'effet du pH du sol n'est pas significatif.



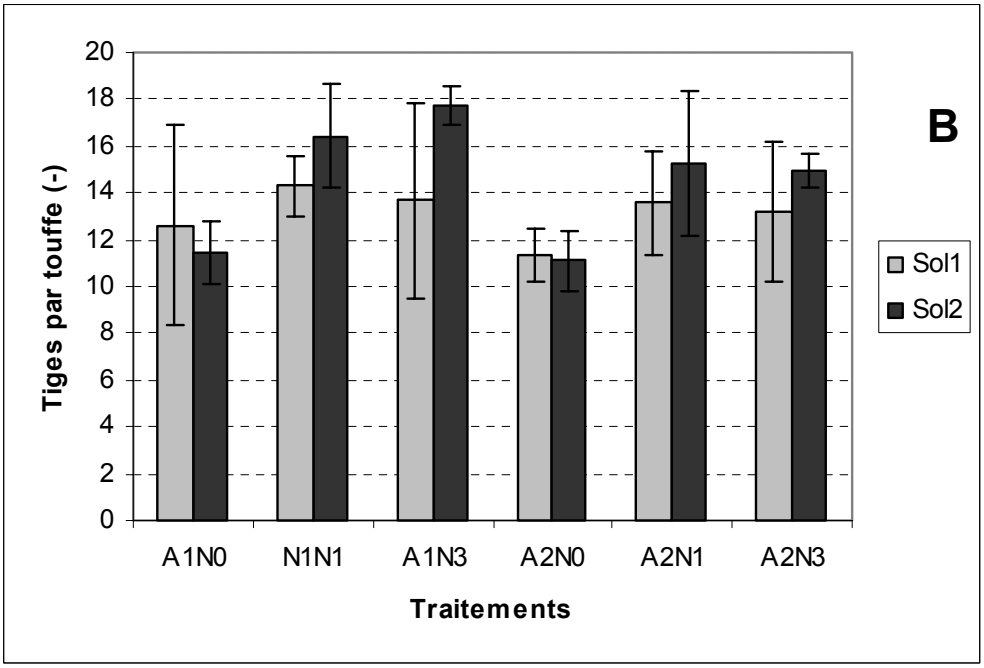


Figure 4.68 : influence des traitements sur le tallage.

(A) en fonction de la lame gestion de la lame d'eau et de l'azote ; (B) en fonction de l'âge des plants au repiquage et de l'azote.

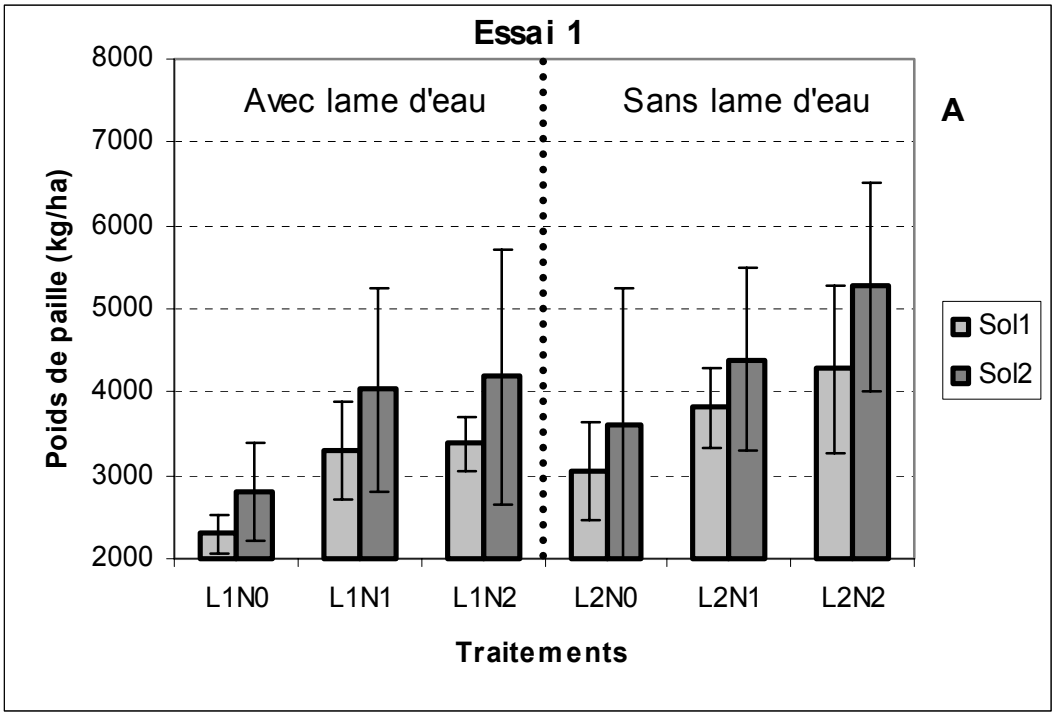
4.3.1.5 Nombres de tiges/poquets

Cette variable renseigne sur l'intensité du tallage et les conditions de croissance avant l'initiation paniculaire (figure 4.68).

Pour l'essai 1, et de manière similaire pour les sols alcalin (sol2) et non alcalin (sol1), l'effet des traitements est significatif aux seuils de 10% et 5% respectivement. La fertilisation azotée et l'assec lors de l'apport d'engrais conduisent à une augmentation non significative du tallage.

Pour l'essai 2, l'effet des traitements est très significatif sur le sol alcalin (sol 2, seuil de 1%) et non significatif sur le sol non alcalin (sol1). Le tallage est amélioré par la fertilisation azotée et l'utilisation de plants jeunes pour le repiquage. L'influence de la fertilisation sur le sol 2 est le seul effet significatif (seuil de 10%).

On n'observe aucune relation significative avec le pH du sol.



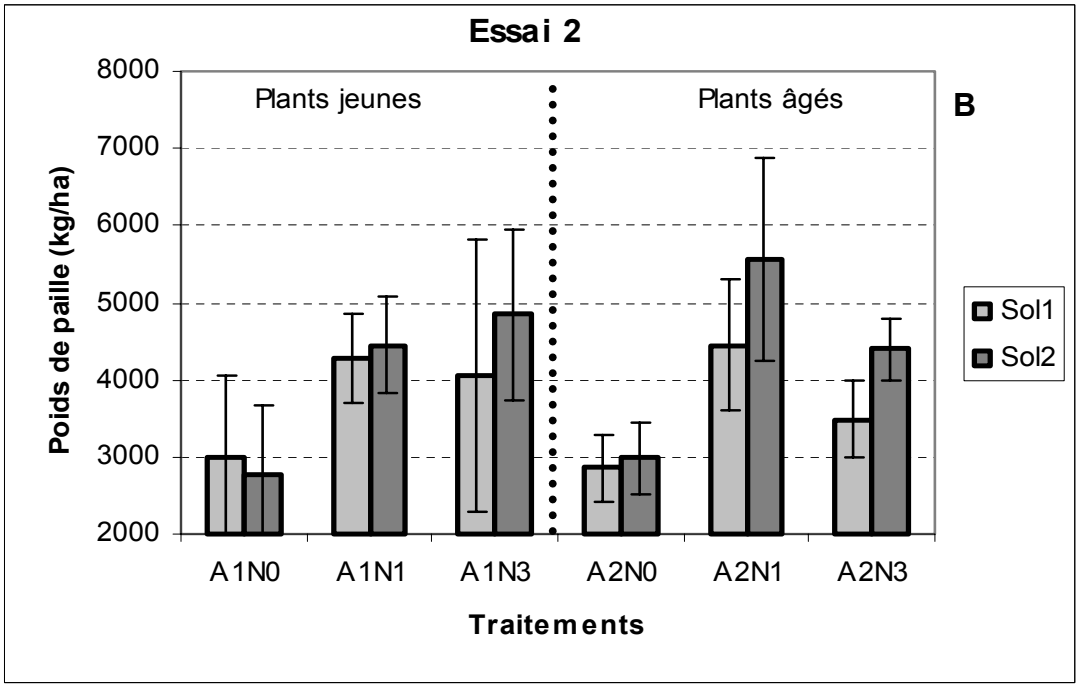


Figure 4.69 : influence de la gestion de la lame d'eau (A) et de l'âge des plants au repiquage sur la production de paille.

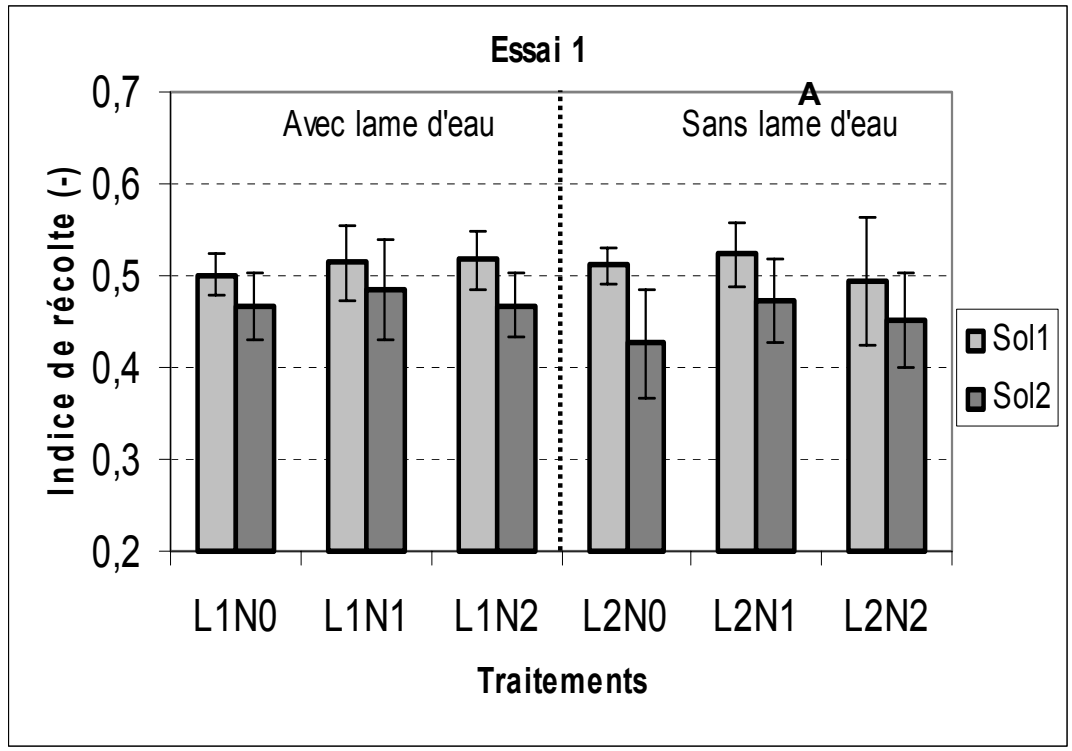
4.3.1.6 Poids de paille

Cette variable renseigne sur les conditions globales de croissance pendant le cycle (figure 4.69).

Pour l'essai 1, l'effet des traitements est significatif sur le sol alcalin (sol 2, seuil de 5%) et très significatif pour le sol non alcalin (sol 1, seuil de 1%). Pour le sol 1, l'effet de la fertilisation azotée est significatif en association avec un assec (L2N2 supérieur à L2N0 au seuil de 10%). Globalement, la fertilisation azotée et l'assec conduisent à un accroissement systématique de la production de paille.

Pour l'essai 2, l'effet des traitements est très significatif sur le sol alcalin (sol 2, seuil de 0.1%) et non significatif sur le sol non alcalin (sol1). Sur le sol alcalin (sol2), l'effet de la fertilisation azotée est significatif (A2N1 supérieur à A2N0 au seuil de 1% ; A2N3 supérieur à A2N0 au seuil de 5% ; A1N1 et A1N3 supérieurs à A1N0 au seuil de 10%). On n'observe pas de tendance claire quant à l'effet de l'age des plants au repiquage ; les plants âgés semblent cependant favorables à la production de paille, en cas d'apport d'azote à la reprise (A2N1 supérieur à A1N1).

On n'observe pas non plus de relation significative entre le poids de paille et le pH des sols, mais les quantités moyennes sont supérieures sur le sol alcalin (sol2) par rapport au sol non alcalin (sol1).



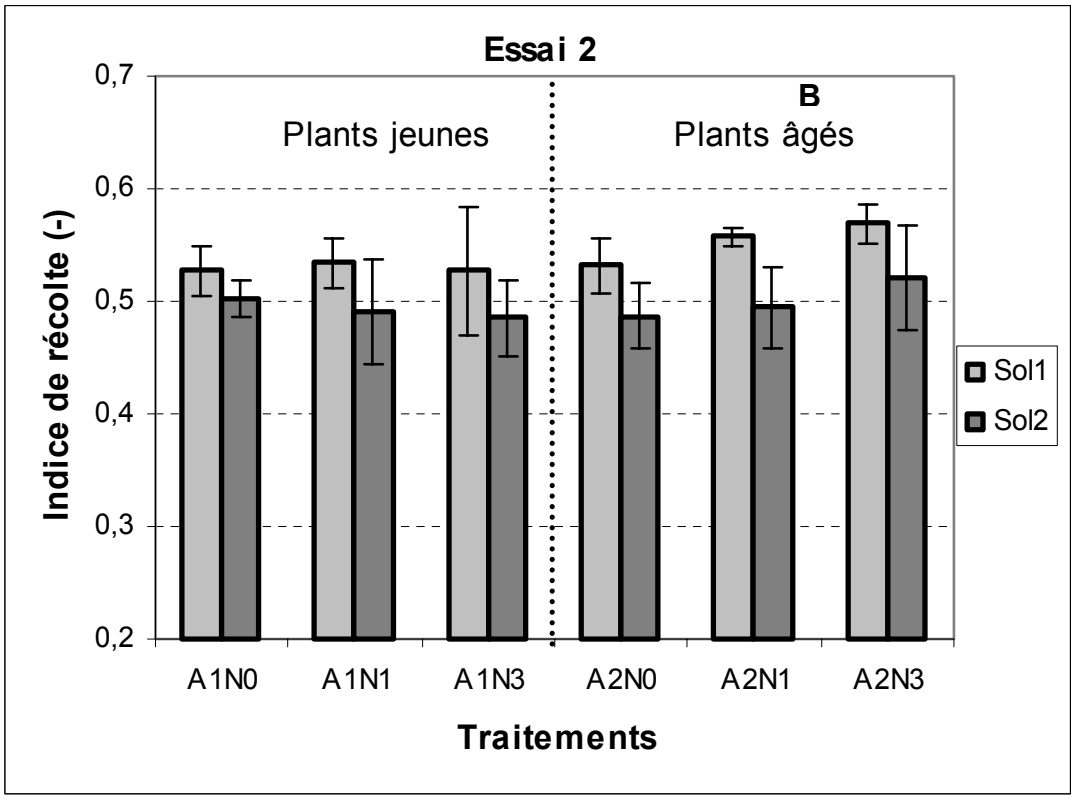


Figure 4.70 : influence de la gestion de la lame d'eau (A), de l'âge des plants au repiquage (B) et des apports d'azote sur indice de récolte.

4.3.1.7 Indice de récolte

Les traitements n'induisent aucune différence significative d'indice de récolte (rapport entre la production de grains et la matière sèche totale) et la moyenne est similaire au potentiel du riz (proche de 0,5 d'après Yoshida, 1981).

Par contre on observe une relation très significative (seuil de 0.1%) entre l'indice de récolte et le pH du sol (figure 4.71). Le sol alcalin (sol2) apparaîtrait donc à la fois plus favorable à la production de paille et relativement défavorable à la production de grain. Cet effet est plus marqué lorsqu'on crée un assec (figure 4.70A) lors des apports d'azote ou, dans une moindre mesure, lors du repiquage de plants âgés (figure 4.70B).

Malgré la relation significative entre le pH et l'indice de récolte, on observe une dispersion des valeurs qui pourrait être en relation avec l'existence possible d'autres facteurs limitants en dehors du pH et qui pourrait être liée à certains éléments nutritifs.

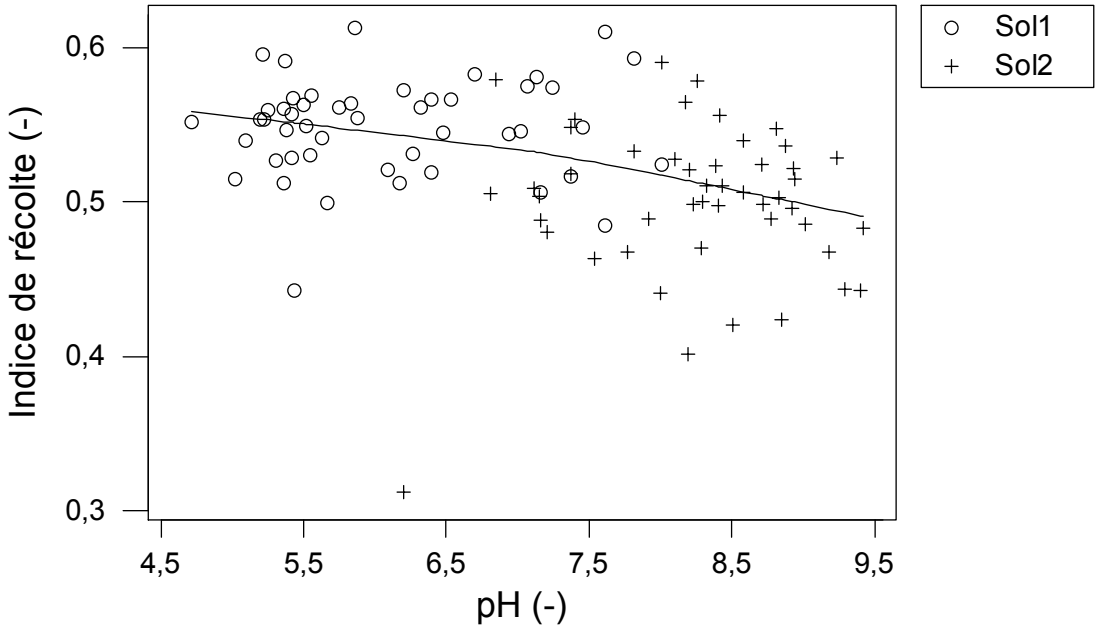


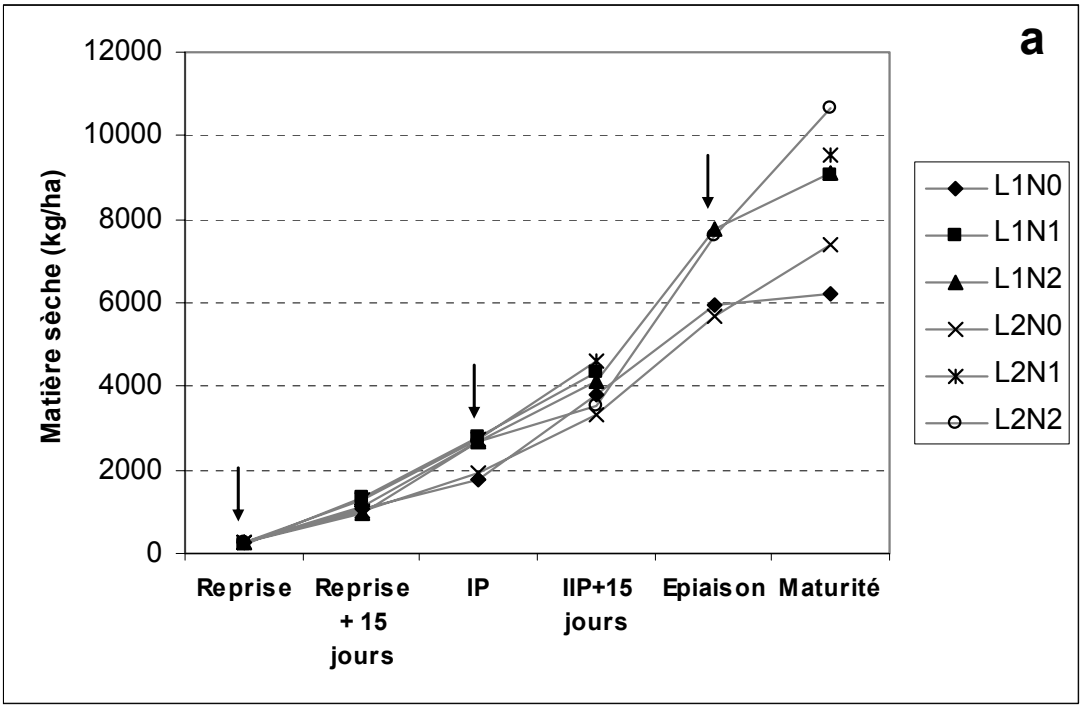
Figure 4.71 : analyse de la relation entre le pH du sol et l'indice de récolte.

4.3.2 Croissance du couvert végétal

4.3.2.1 Production de biomasse aérienne

Pour l'essai 1 comme pour l'essai 2, l'évolution de la biomasse aérienne moyenne des deux types de sol permet de différencier les traitements fertilisés dès l'initiation paniculaire. L'écart ne cesse ensuite de croître jusqu'à la récolte. Les autres traitements conduisent à une évolution globalement similaire de la biomasse.

Nous avons cependant distingué l'influence particulière du type de sol en interaction avec la lame d'eau sur l'essai 1 (figure 4.72A), et l'age des plants au repiquage sur l'essai 2 (figure 4.72B). On observe d'abord une production de biomasse systématiquement plus élevée sur le sol alcalin (sol2). Pour l'essai 1, les deux types de sol ne se différencient qu'à partir de l'épiaison jusqu'à la récolte. Pour l'essai 2, la situation est inverse et le meilleur développement observé pendant toute la durée du cycle semble s'être résorbé à la maturité. On observe ensuite un effet favorable des assecs à l'occasion des apports d'engrais ; alors que la production de biomasse semble stagner en fin de cycle avec le maintien continu d'une lame d'eau, la croissance se poursuit jusqu'à la fin du cycle lorsque des assecs ont été créé pour les apports d'engrais. On observe enfin une meilleure croissance de la biomasse aérienne liée au repiquage de plants âgés jusqu'à l'initiation paniculaire.



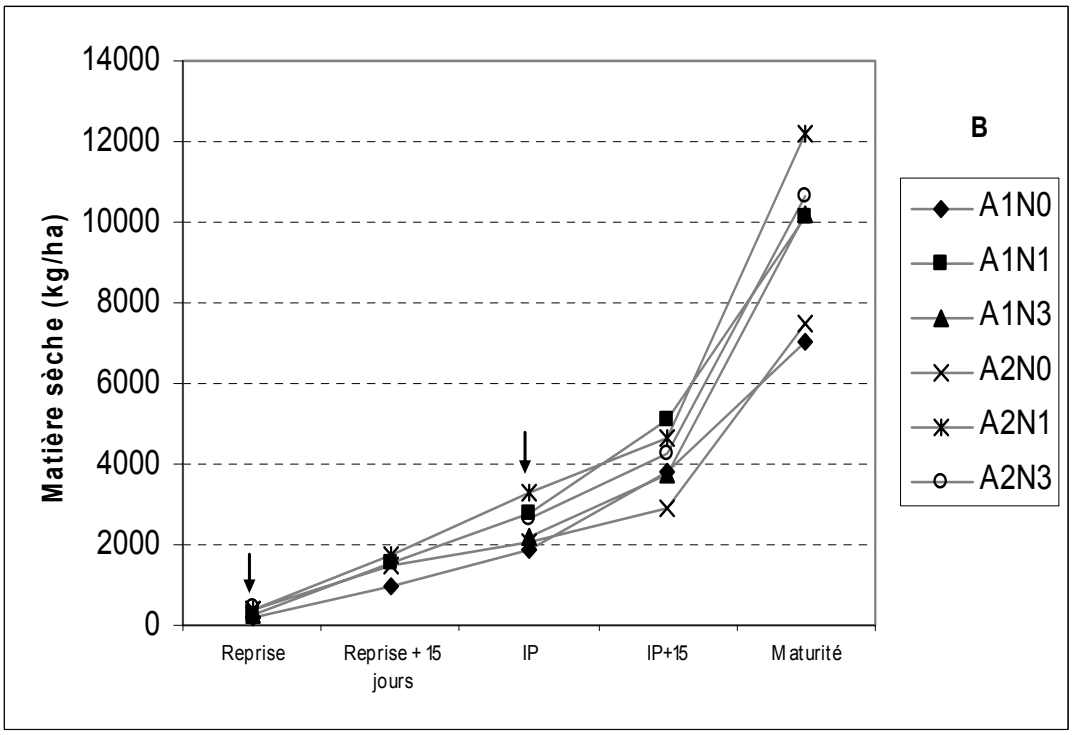
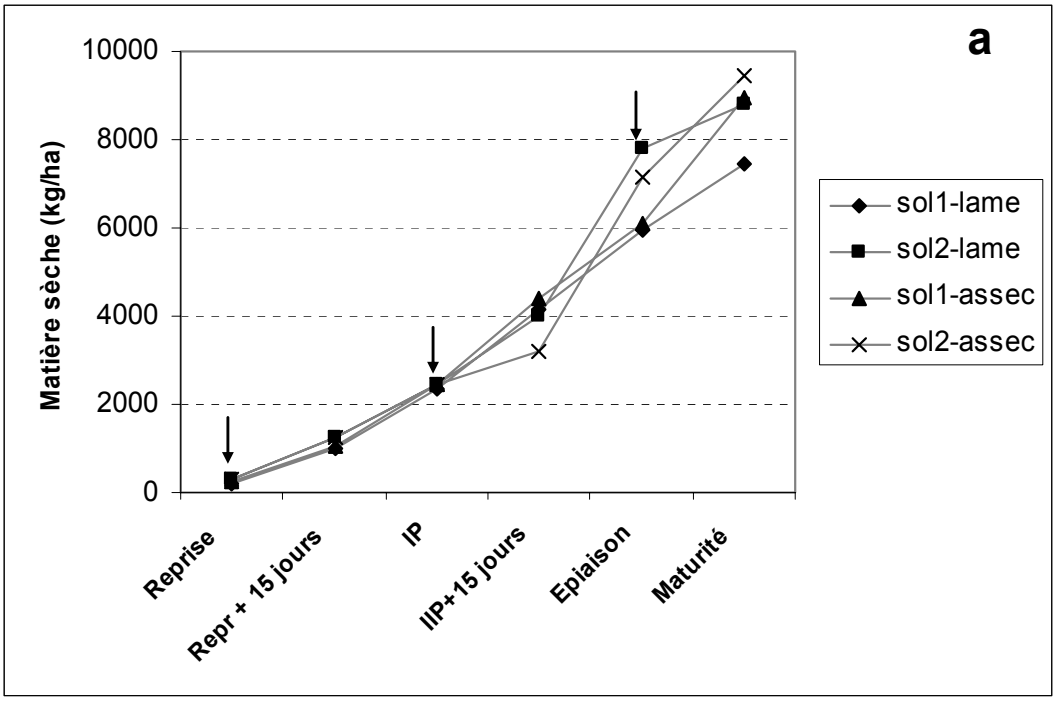


Figure 4.72 : évolution de la matière sèche aérienne. (A)= essai 1 ; (B) = essai 2

Les flèches correspondent aux apports d'azote. Pour l'essai 2, A1N3 et A2N3 n'ont pas reçu d'azote à l'IP



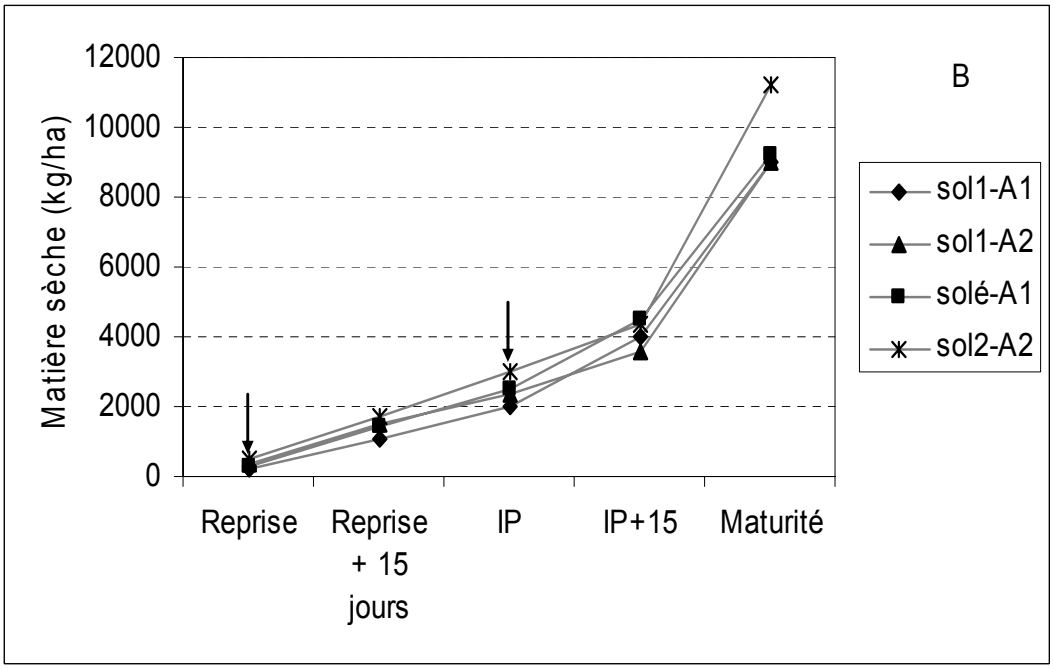


Figure 4.73 : évolution de la matière sèche aérienne sur les deux sols. (A)= essai 1 ; (B) = essai 2

Les flèches correspondent aux apports d'azote. Pour l'essai 2, A1N3 et A2N3 n'ont pas reçu d'azote à l'IP (A1=plants jeunes ; A2=plants âgés)

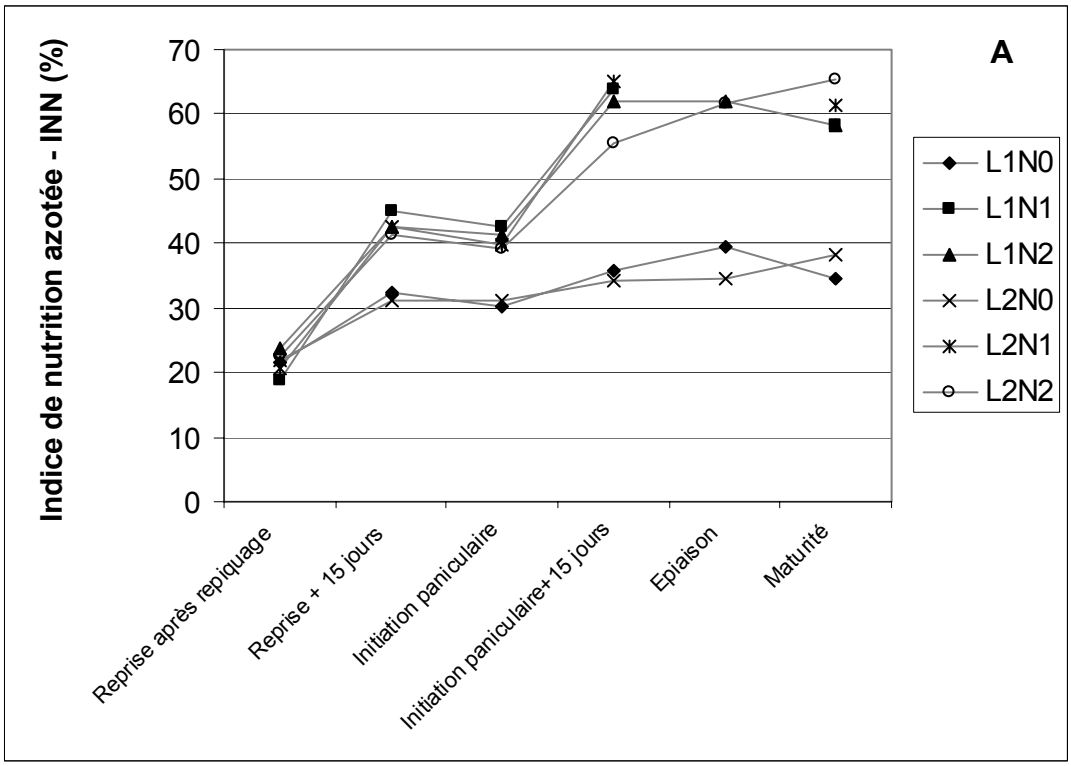
4.3.2.2 Indice de nutrition azote (INN)

Les courbes de dilution de l'azote représentent la diminution progressive de la teneur en azote avec l'accroissement de la biomasse aérienne. L'INN représente le ratio entre la teneur en azote du riz et une teneur critique représentant les conditions optimales d'alimentation azotée et utilisée comme référence (figure A.84 ; annexe). Les valeurs obtenues restent sensiblement inférieures aux valeurs attendues, notamment en début de cycle. Bien que la courbe critique de dilution utilisée (Sheehy et al, 1998) n'ait pas été validée dans les conditions de l'expérimentation, nous avons néanmoins conservé ce mode de représentation qui permet une comparaison efficace des conditions d'alimentation azotée rencontrées par la culture en fonction des traitements et du type du sol.

L'INN moyen des sols alcalins et non alcalins a d'abord été représenté pour chacun des essais 1 et 2 (figure 4.74). Pour les deux essais, l'absence de fertilisation azotée conduit rapidement à un effet dépressif sur l'alimentation azotée du riz dès après le repiquage et jusqu'à la récolte. Pour l'essai 1, seul le traitement L2N2 correspondant à la pratique d'un assec et d'un fractionnement des apports d'engrais se différencie par des conditions d'alimentation azotée moins bonnes après l'initiation paniculaire puis meilleures à la maturité. Pour l'essai 2, les différenciations observées mettent en évidence de meilleures conditions d'alimentation azoté : pour le repiquage de plants âgés, d'une part, et suite à un apport d'engrais après le repiquage, d'autre part.

Nous avons ensuite distingué l'influence particulière du type de sol sur l'INN en interaction avec la lame d'eau sur l'essai 1, et l'âge des plants au repiquage sur l'essai 2 (figure 4.75). Pour l'essai 1, les résultats montrent de moins bonnes conditions d'alimentation azotée sur le sol non alcalin (sol1) puis son rattrapage à l'issue de chaque apport d'engrais au repiquage et à l'initiation paniculaire. Les meilleures conditions d'alimentation azotée semblent être obtenues en présence d'une lame d'eau continue sur le sol alcalin (sol 2), et suite à la pratique d'assecs lors des apports d'engrais pour le sol non alcalin (sol 1). L'essai 2 confirme les observations précédentes quant à de meilleures conditions d'alimentation azotée sur le sol alcalin (sol2) et semble indiquer une

bonne adaptation des plants âgés aux conditions de sol alcalin (sol 2) tandis que leurs alimentation azotée semble pénalisée sur le sol non alcalin (sol 1).



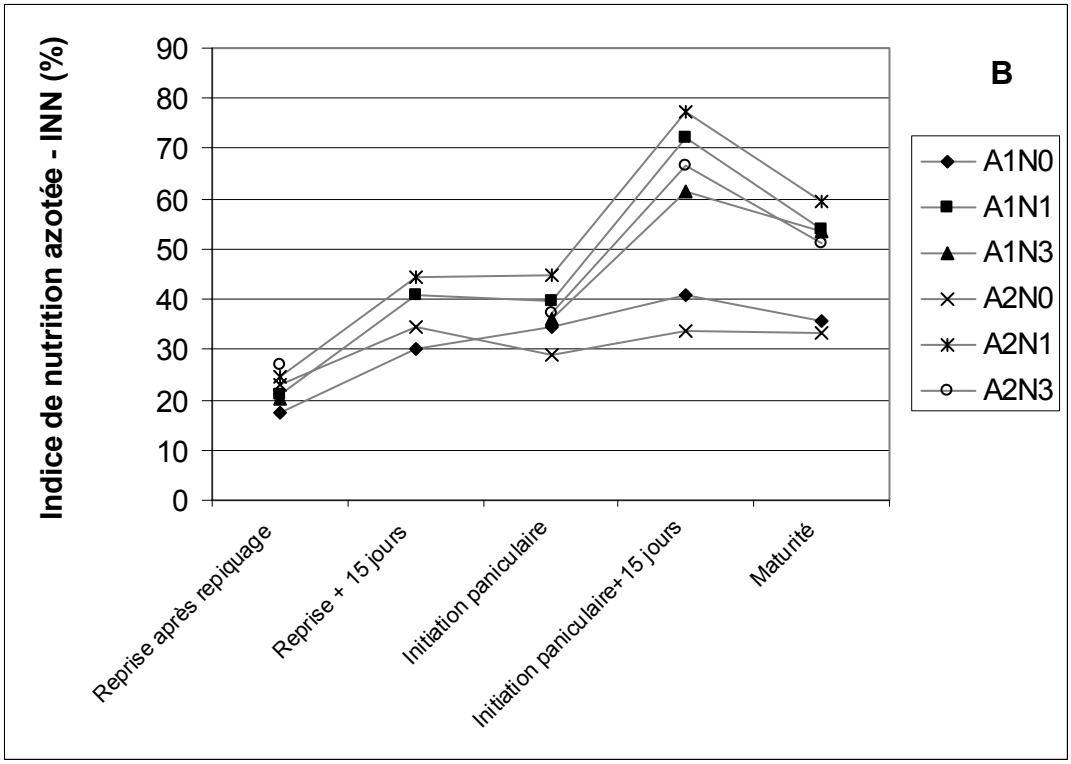
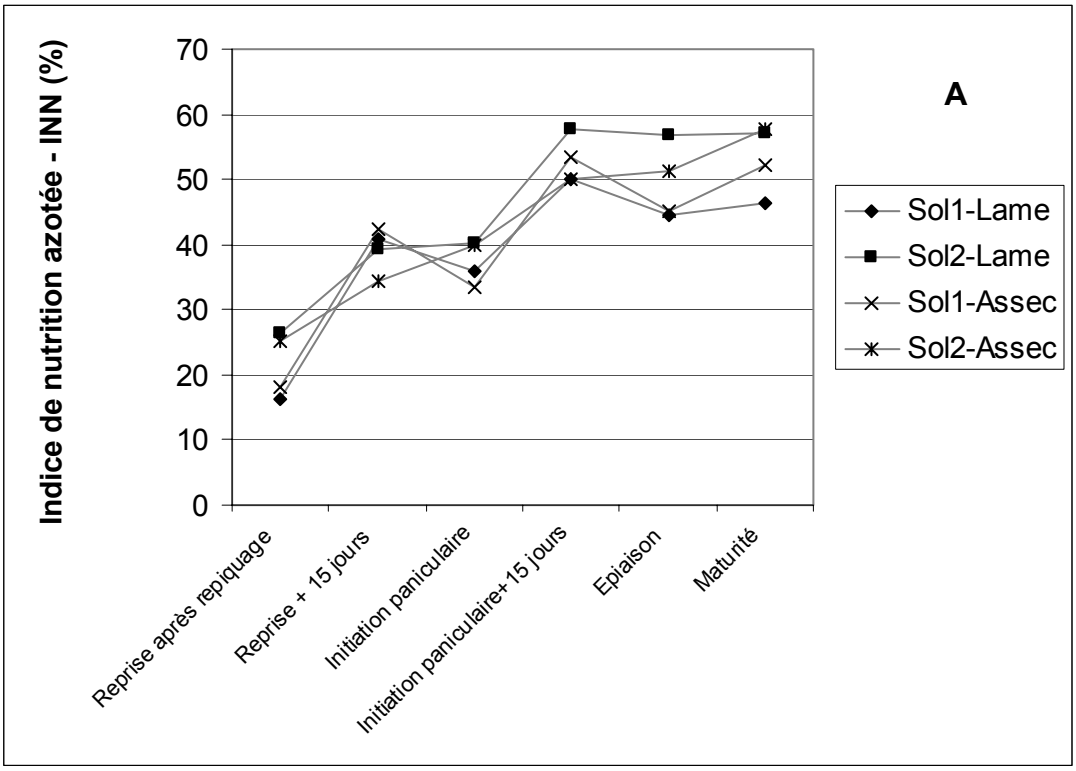


Figure 4.74 : effet de traitements sur le statut azoté de la plante aux différents stades.
(A) : influence de la gestion de la lame d'eau ; (B) influence de l'âge des plants.



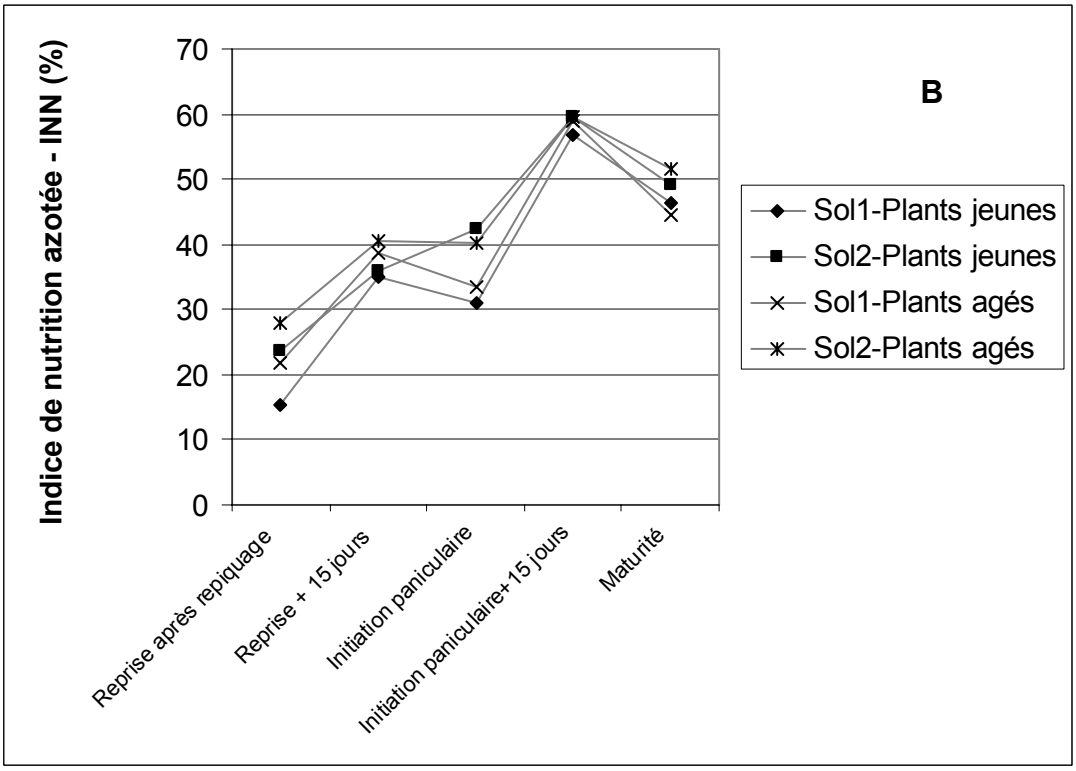
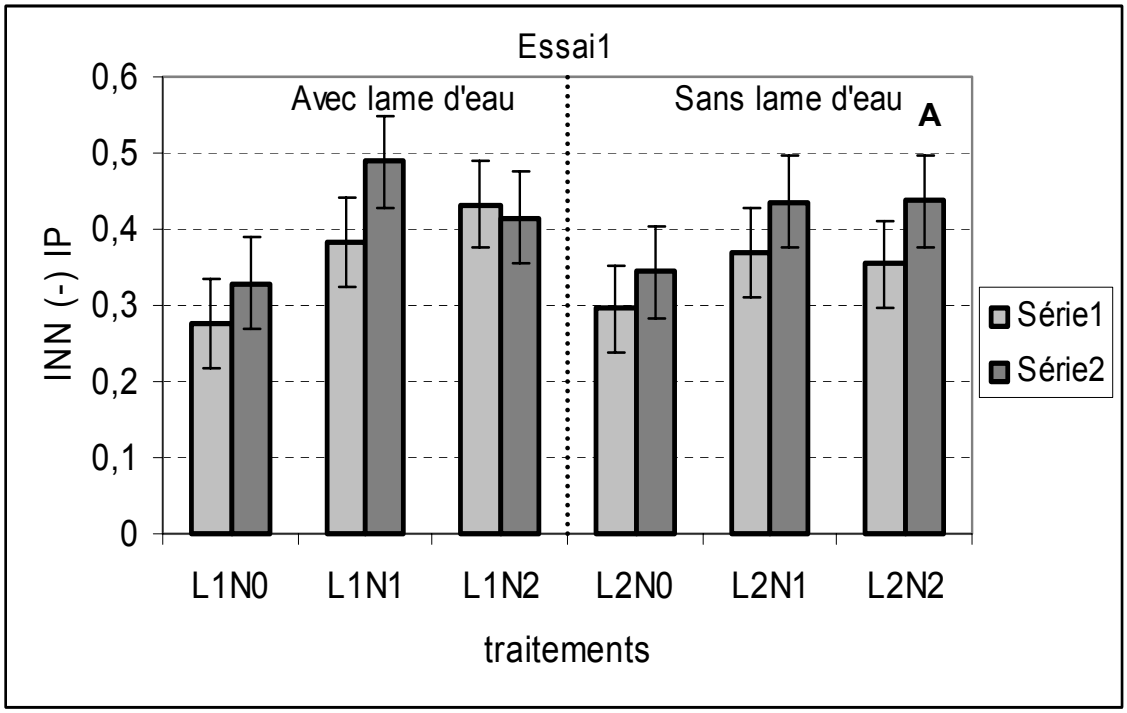


Figure 4.75 : influence du type de sol sur le statut azoté du riz.

(A) : influence de la lame d'eau ; (B) : influence de l'âge des plants.



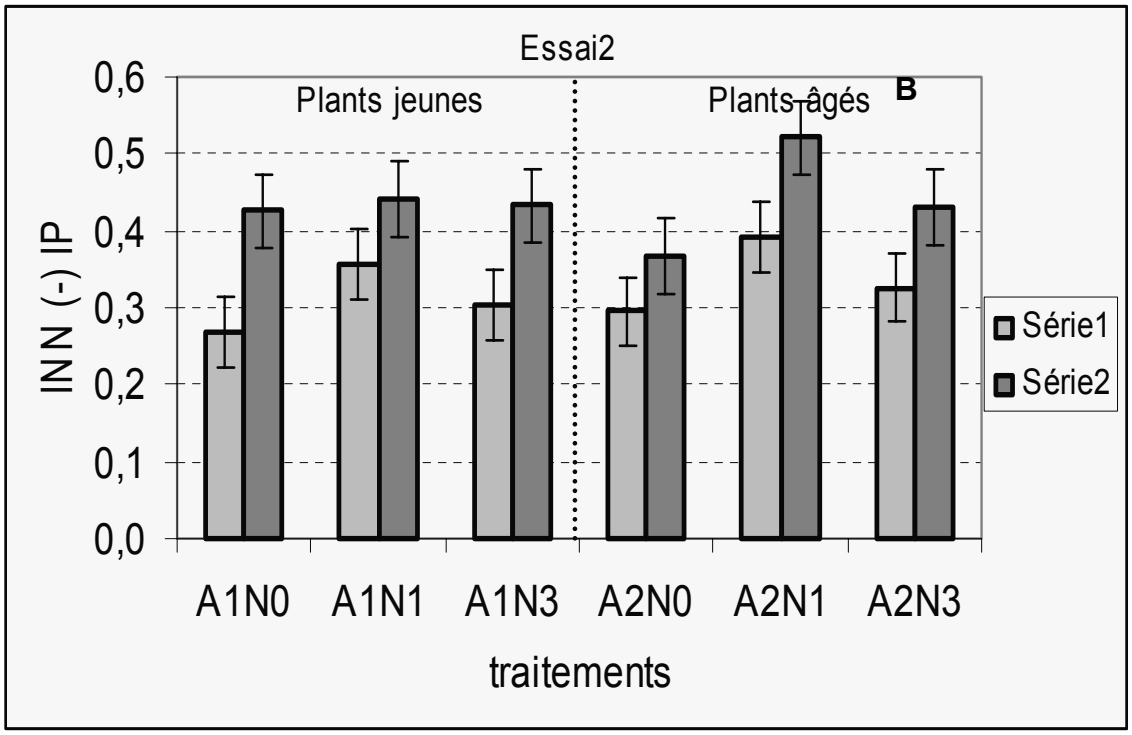


Figure 4.76 : indice de nutrition azoté à l'initiation paniculaire pour les deux essais et en fonction de traitements.

Nous avons complété l'analyse par une analyse de variance de l'INN à l'initiation paniculaire qui est généralement considéré comme un stade déterminant pour l'élaboration du rendement (figure 4.76).

Pour l'essai 1, l'effet des traitements est très significatif (seuil de 1%) sur le sol non alcalin (sol1) et l'INN est significativement supérieur sur les traitements fertilisés par rapport au témoin, seulement en relation avec la présence continue d'une lame d'eau. La présence d'une lame d'eau semble en outre susceptible d'améliorer l'efficacité de la fertilisation azotée. L'effet des traitements n'est pas significatif sur le sol alcalin (sol 2) même si la fertilisation azotée conduit à une amélioration appréciable de l'INN.

Pour l'essai 2, l'effet des traitements est significatif (seuil de 5%) sur le sol non alcalin (sol1). L'effet de la fertilisation n'est significatif que dans le cas d'un apport fractionné de l'azote en présence d'une lame d'eau (L1N2 supérieur à L1N0 au seuil de 5%). L'effet des traitements n'est pas significatif sur le sol alcalin (sol2).

Le résultat le plus appréciable est l'existence d'une relation très significative (seuil de 0.1%) entre l'INN à l'initiation paniculaire et le pH du sol (figure 4.77)

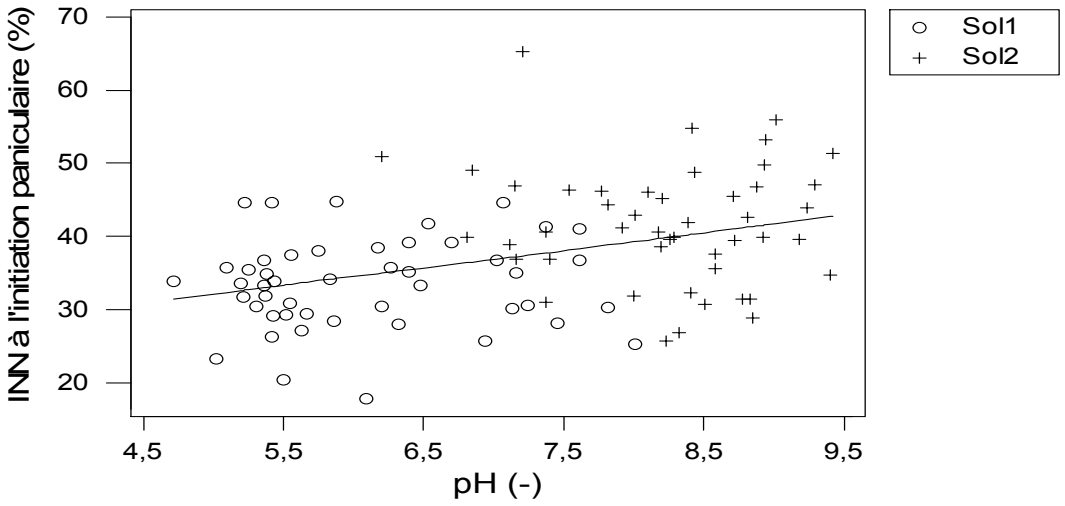
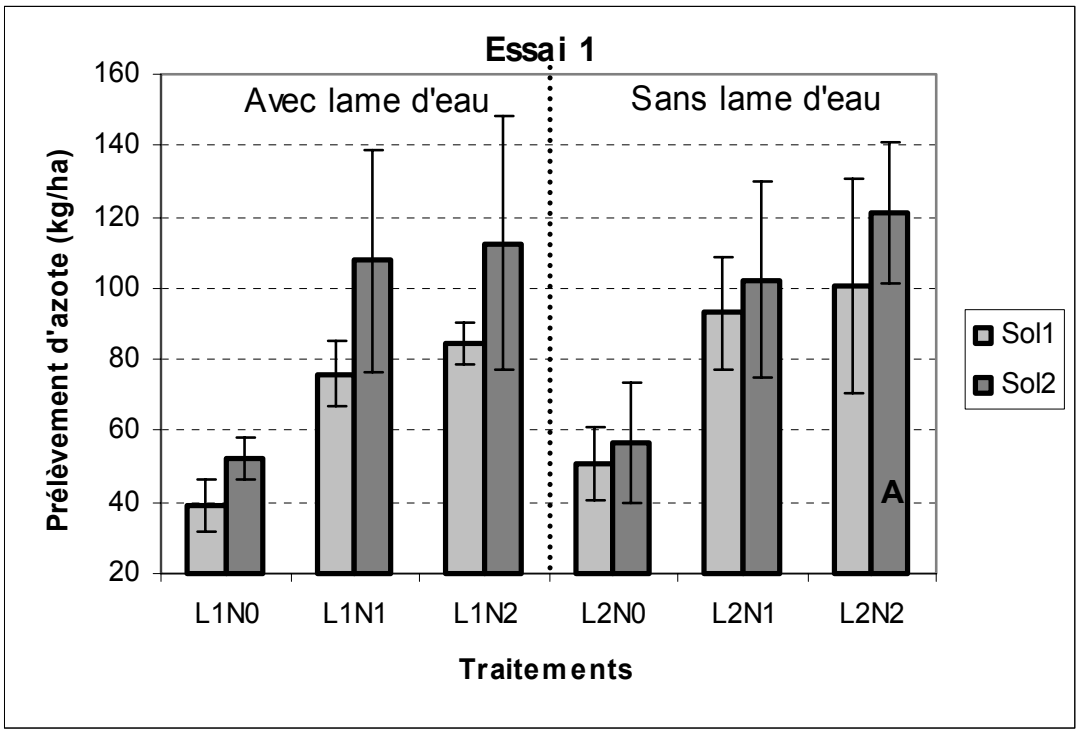


Figure 4.77 : influence du pH sur l'INN à l'initiation paniculaire ; effet positif très significatif (seuil de 0,1%) et faible variabilité des valeurs.



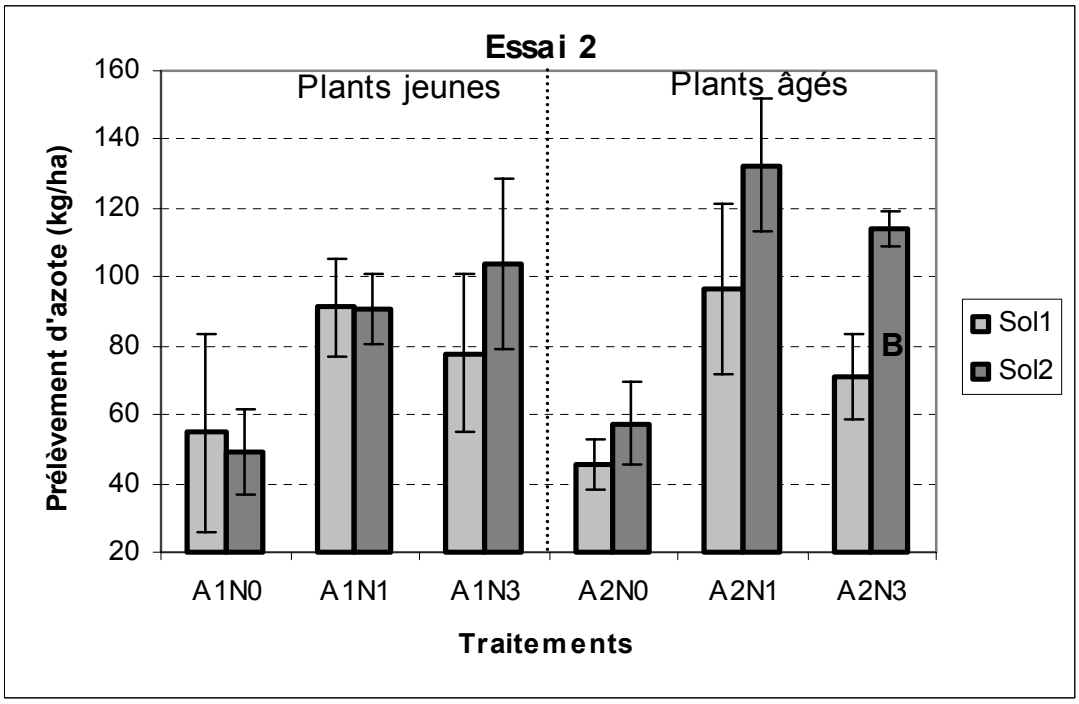


Figure 4.78 : prélèvement d'azote en fonction des traitements. Effet favorable du sol 2, des plants âgés (B), mais pas de l'assec (A).

4.3.2.3 Prélèvement d'azote (accumulation d'azote dans les parties aériennes)

Le prélèvement d'azote apparaît comme la résultante de la production de biomasse aérienne et des conditions d'alimentation azotée de la culture présentées précédemment (figures 4.72 et 4.76).

Pour l'essai 1, l'effet des traitements est très significatif (seuil de 0.1%) sur le sol alcalin (sol 2) et le sol non alcalin (sol 1). Les quantités d'azote prélevés sur les traitements fertilisés sont tous significativement supérieures (seuil de 1%) à celle des traitements témoin. La pratique de l'assec conduit à un accroissement appréciable des prélèvements d'azote sur le sol non alcalin (sol 1). (figure 4.78A)

Pour l'essai 2, l'effet des traitements est significatif (seuil de 5%) sur le sol non alcalin (sol1) et très significatif (seuil de 0.1%) sur le sol alcalin (sol2). L'effet de la fertilisation est significatif sur le sol alcalin (sol2, seuil de 1%) et sur le sol non alcalin seulement en cas d'apport d'azote au repiquage (seuil de 10%). On observe aussi un effet favorable très significatif du repiquage des plants âgés en cas d'apport d'engrais au repiquage (A2N1 supérieur à A1N1 au seuil de 0.1%).

On observe enfin une corrélation positive significative (seuil de 10%) entre le pH du sol et la quantité d'azote prélevée (figure 4.79).

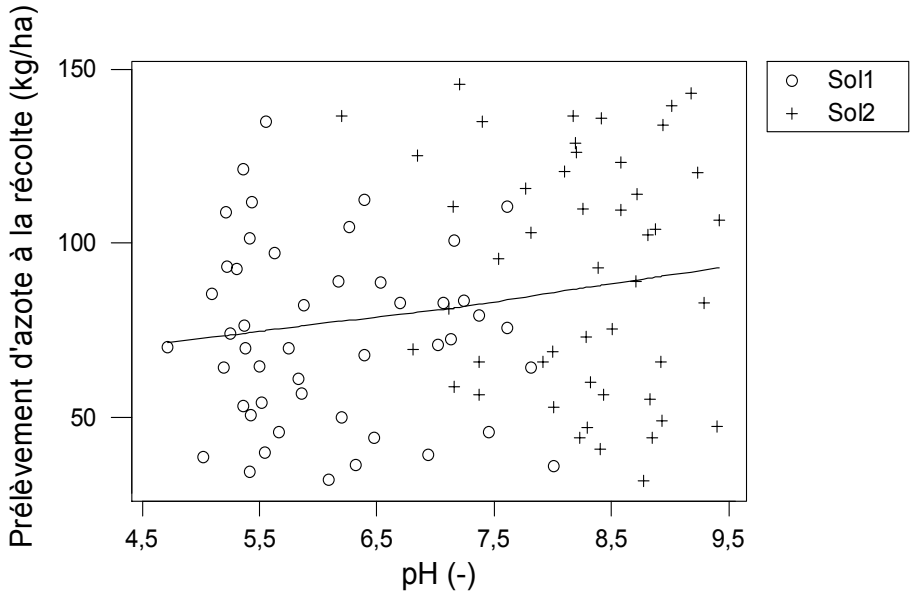
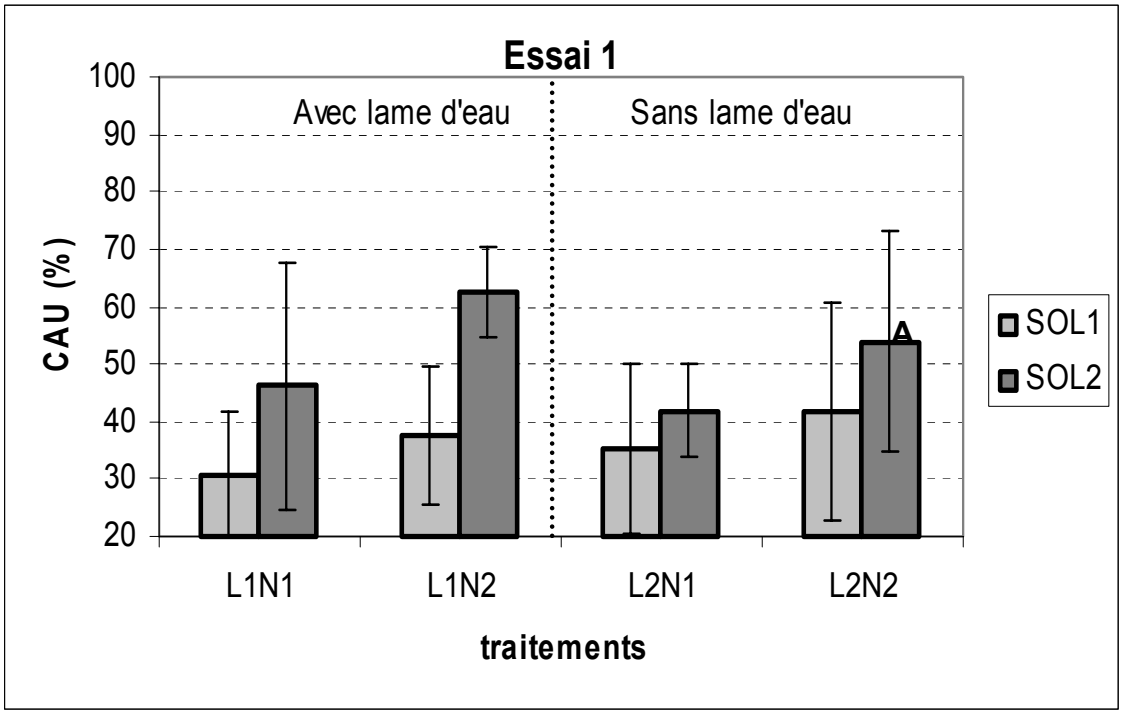


Figure 4.79 : influence du pH sur le prélèvement d'azote ; effet positive et significatif au seuil de 10%, mais une forte variabilité des valeurs.



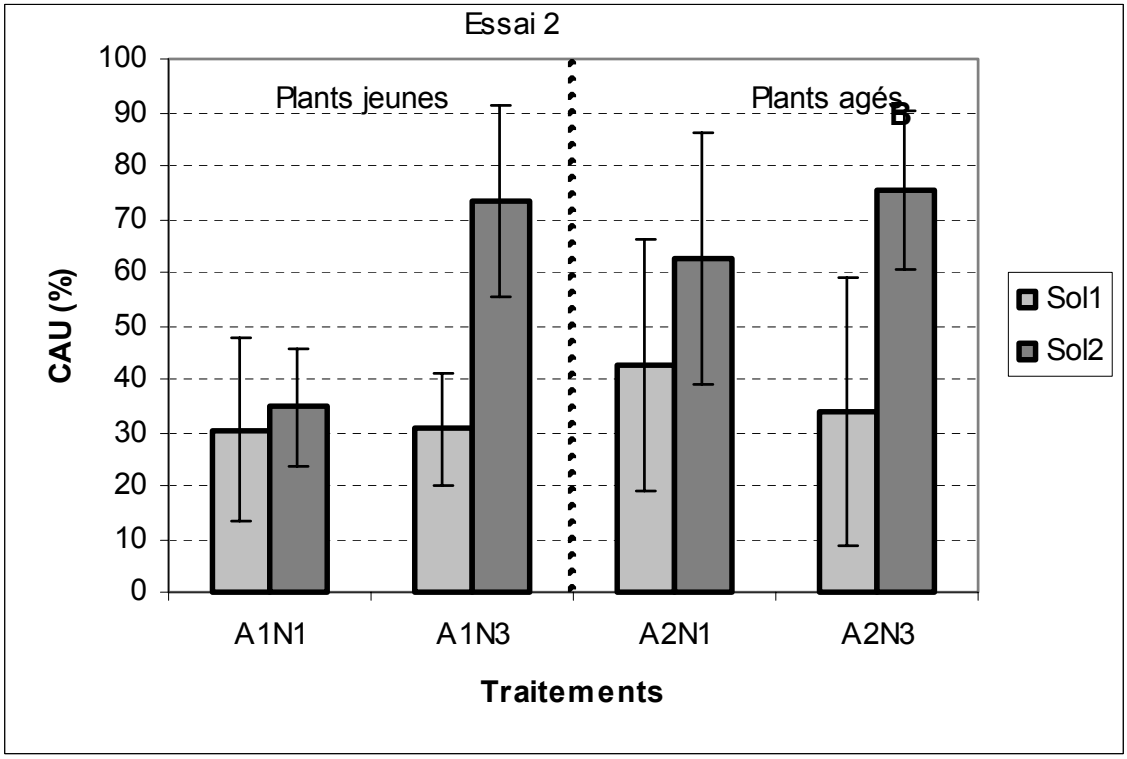


Figure 4.80 : évolution du coefficient apparent d'utilisation de l'azote apporté

4.3.2.4 Efficacité des apports d'azote (le coefficient apparent d'utilisation)

Le coefficient apparent d'utilisation des engrais azoté renseigne sur le pourcentage d'azote apporté sous forme de fertilisants effectivement utilisé par la culture.

Pour les deux sols sur l'essai1 et le sol non alcalin (sol1) de l'essai 2, les traitements n'ont pas d'effet significatif sur le coefficient apparent d'utilisation (CAU). Pour l'essai 2 l'effet des traitements est significatif (seuil de 5%) sur le sol alcalin (sol2). Le CAU est significativement supérieur (seuil de 10%) en l'absence d'apport au repiquage (A1N3) sur les plants jeunes.

Il convient aussi de noter que le fractionnement des apports d'azote (L1N2 ou L2N2) réalisé en fin de cycle sur l'essai 1 semble conduire à une amélioration de l'efficacité d'utilisation des engrais azotés tandis que l'apport supplémentaire réalisé à la reprise (A1N1 ou A2N1) sur l'essai 2 se traduit par une diminution sensible du CAU. La période initiale du cycle apparaît ainsi plus sensible aux pertes d'azote.

Dans le même temps, la réalisation d'un assec lors des apports de fertilisants conduit à une augmentation du CAU sur le sol non alcalin (sol1) et une diminution sur le sol alcalin (sol2) sur l'essai 1. Sur l'essai 2, le repiquage de plants âgés s'accompagne d'une augmentation systématique du CAU.

Enfin, on obtient une relation très significative (seuil de 1%) entre le CAU et le pH du sol, l'apport d'engrais azoté s'avérant plus efficace sur sol alcalin (sol2) (figure 4.81).

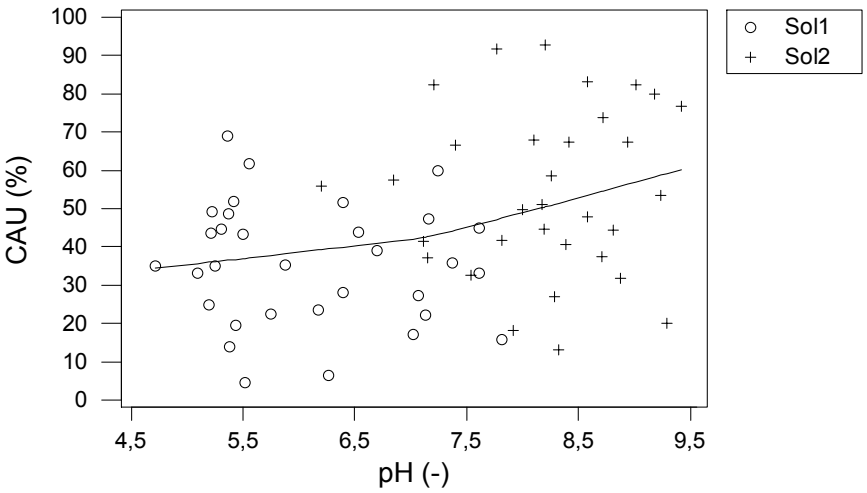


Figure 4.81 : influence positive et significative (1%) du pH sur l'efficience de l'azote.

4.3.3 Conclusion : relation entre le type de sol, les conditions d'alimentation azotée et les composantes du rendement

Dans cette dernière partie de résultats, ont été passées en revue les relations existantes entre le pH du sol, les conditions d'alimentation azotée de la culture (INN) à l'initiation paniculaire, les indicateurs représentatifs de l'efficacité des apports d'engrais (CAU) et les composantes du rendement que sont le nombres de tiges, le nombre de panicules par tige, le poids de 1000 grains, les rendements en grains et paille, la production de matière sèche et l'indice de récolte. Les différentes corrélations de Pearson et valeurs de probabilité associées sont indiquées dans le tableau 4.12.

Tableau 4.12 : corrélation entre le pH du sol et le statut azoté des plants à l'IP d'une part et les indicateurs d'efficacité des apports d'azote de la culture d'autre part

Indicateurs d'efficacité de N	pH	INN à l'IP
INN à l'initiation paniculaire	0.248 (0.015)	
CAU à la maturité	**0.342 (0.006)**	**0.466 (0.000)**
Nombre de tiges	*0.115 (0.266)*	**0.396 (0.000)**
Nombre de panicules par tige	-0.220 (0.031)	**-0.271 (0.008)**
Poids de 1000 grains	**-0.376 (0.000)**	0.200 (0.052)
Rendement grain	*-0.110 (0.288)*	**0.394 (0.000)**
Rendement paille	*0.154 (0.134)*	**0.520 (0.000)**
Matière sèche totale	*0.090 (0.383)*	**0.566 (0.000)**
Indice de récolte	**-0.373 (0.000)**	-0.203 (0.048)

Italique : Non Significatif (p>10%) – **Gras : Très Significatif (p<1%)**

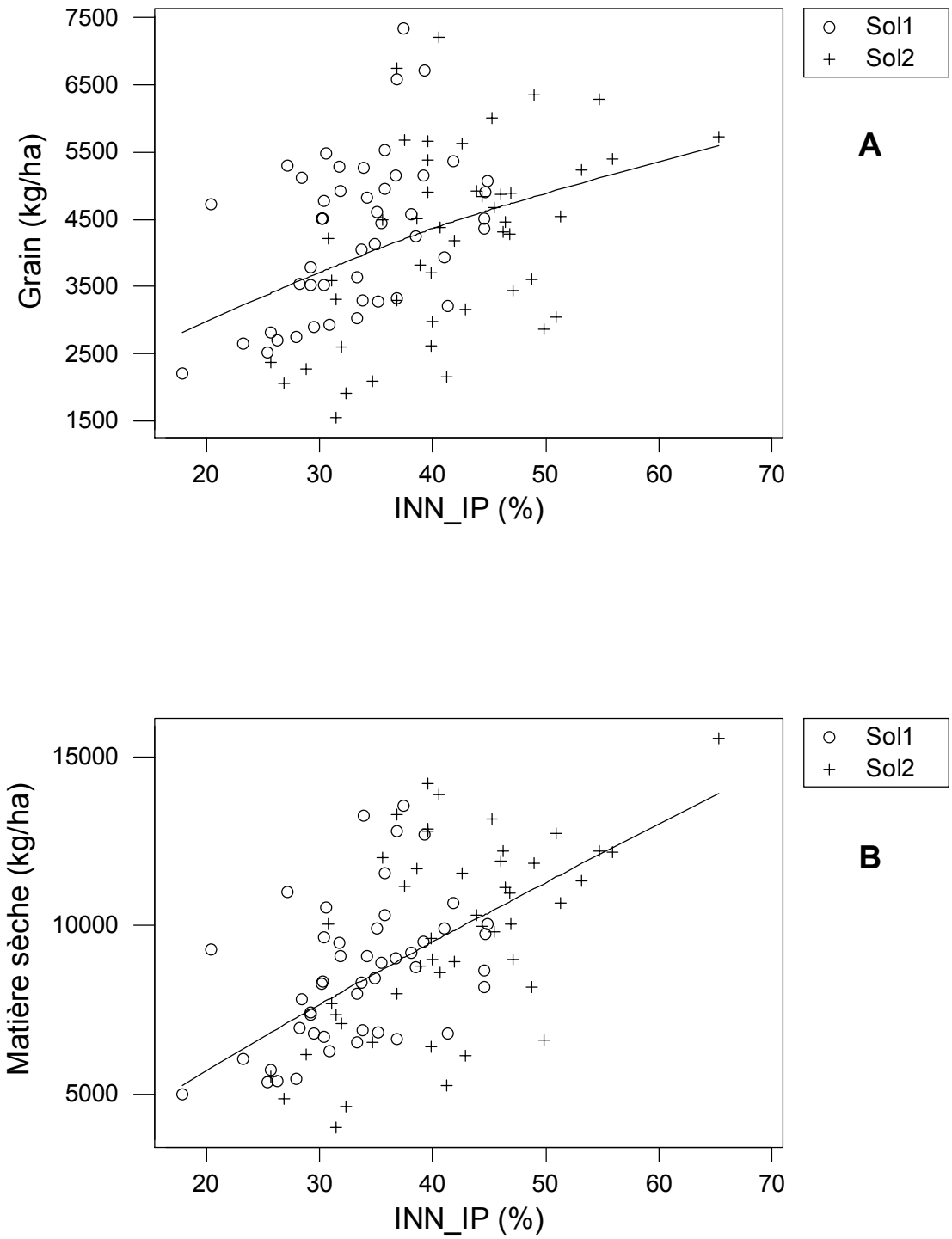


Figure 4.82 : influence du statut azoté des plants à l'IP sur (A) le rendement et (B) la production de matière sèche total.

Le pH alcalin des sols contribue donc à améliorer significativement l'efficacité des apports d'engrais et les conditions d'alimentation azotée des cultures, et indiquerait donc de moindres pertes d'azote dans le système. *A contrario*, le pH semble affecter défavorablement la phase de remplissage des grains.

De meilleures conditions d'alimentation azotée de la culture, appréhendées à travers l'Index de Nutrition azoté (INN) à l'initiation paniculaire, conduisent principalement à un meilleur développement végétatif qui se manifeste sur le nombre de tiges et la production de matière sèche (figure 4.82A), et dans une moindre mesure par un accroissement de la production de grains (figure 4.82B). L'effet dépressif de bonnes conditions d'alimentation azotée sur le nombre de panicules ne semble pouvoir être expliqué qu'indirectement à travers l'augmentation du pH induite par l'apport d'engrais.

L'analyse a été complétée par une régression multiple réalisée pas à pas qui montre que le rendement grain (kg/ha) peut-être expliqué par les conditions d'alimentation azotée et le pH selon la relation suivante :

$$kgGrains/ha = 78 \times INN_IP\ (p=0.000) - 282 \times pH\ (p=0.008) + 3318.$$

KgGrains/ha = Rendement grain ; p=probabilité

Le pH interviendrait donc à la fois pour améliorer les conditions d'alimentation azotée et le développement végétatif de la culture, mais affecterait aussi la mise en place et le développement des organes reproducteurs, et *in fine* la production de grains.

4.4 Discussion

L'**efficacité des apports d'engrais** et les **conditions de nutrition minérale du riz** sont systématiquement plus favorables sur les sols les plus alcalins. Cela se manifeste sur le Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote apporté (CAU) comme sur l'indice de Nutrition azoté (INN) qui sont étroitement corrélés au pH du sol, et sensiblement plus élevés sur le site 2 (sol alcalin) par rapport au site 1 (sol non alcalin). Sur le sol non alcalin, les conditions d'alimentation azotées apparaissent moins favorables dès le début du cycle puis ne sont améliorées que transitoirement suite à l'apport d'engrais azoté. D'après les résultats obtenus précédemment au laboratoire, les pertes attendues par volatilisation d'ammoniac sont plus élevées sur sol alcalin, tandis que les pertes par dénitrification se manifestent essentiellement sur les sols non alcalins en relation avec une activité biologique ou enzymatique plus élevée. Dans le cadre des expérimentations réalisées au champ, les pertes résulteraient donc principalement de l'influence d'un processus de dénitrification dans la première partie du cycle cultural, et avant que ne s'établissent des conditions réductrices s'opposant à la nitrification de l'azote. Ces conditions d'alimentation azotée sont bien entendu améliorées par l'apport d'engrais azoté, mais aussi dans une moindre mesure lorsqu'ils sont associés à la présence d'une lame d'eau sur sol alcalin, ou à la pratique d'un assec sur sol non alcalin. Le repiquage de plants âgés semble aussi conduire à une amélioration des conditions d'alimentation azotée de la culture, notamment sur sols alcalins.

La **production de matière sèche** dépend principalement des conditions de nutrition azotée, et l'indice de Nutrition Azoté (INN) mesuré à l'initiation paniculaire apparaît comme le principal facteur explicatif de la variabilité de la matière sèche produite sur les différentes parcelles du dispositif. Le développement végétatif de la culture est d'abord déterminé par le tallage, et le nombre de tiges est significativement corrélé aux conditions d'alimentation azotée. Il est accru par la fertilisation azotée, mais aussi par la pratique d'un assec lors de l'apport d'engrais quel que soit le type de sol. Le repiquage de plants âgés conduit à une diminution du tallage. *In fine* la matière sèche produite est plus élevée sur le sol alcalin, notamment lorsque l'engrais est apporté après assec. L'apport d'azote en deux fractions (à la reprise et à

l'initiation paniculaire) ou trois (apport ensuite à l'épiaison) n'induit pas de différences significatives. Cependant l'apport d'une troisième fraction d'azote semble favoriser la production de matière sèche en fin de cycle et, dans une moindre mesure, la production de grains (conformément aux travaux de Wopereis-Pura *et al,* 2002). L'abandon du premier apport testé sur l'essai 2, n'induit de baisse appréciable de rendement que dans le cas du repiquage de plants âgés. Sous cette condition la production de matière sèche apparaît même plus élevée suite au repiquage de plants âgés qui semble être en mesure de mieux résister aux conditions défavorables du milieu sur ces sols alcalins.

Le **développement des organes reproducteurs et la production de grain** dépendent de la production de matière sèche et de la nutrition azotée, mais aussi du pH alcalin des sols qui affecte la production de grains et l'indice de récolte. Ce phénomène se manifeste principalement sur le poids de 1000 grains et pourrait être lié à l'implication d'autres facteurs comme la nutrition minérale en Phosphore ou en Zinc généralement déficiente lorsque le pH s'élève (Yoshida, 1981). Le développement des organes reproducteurs est d'abord affecté par une décroissance du nombre de panicules par tige en relation avec l'apport d'engrais azoté lors du repiquage de plants jeunes sur sols alcalins. Le nombre de grains par panicule est ensuite amélioré par la fertilisation azotée, voire le repiquage de plants âgés sur sol non alcalin s'il est associé à un apport d'engrais à la reprise. Le remplissage des grains (poids de 1000 grains) apparaît ensuite affecté par les pH alcalins, mais aussi dans une moindre mesure amélioré par la fertilisation azotée. *In fine*, la production de grains ne se différencie par nettement entre les sols alcalin et non alcalin sous l'influence de deux mécanismes antagonistes. Le pH élevé semble d'abord induire une réduction des pertes d'azote et une amélioration des conditions d'alimentation azotée ; ces processus sont dominants pendant la première phase du cycle cultural et le développement végétatif de la culture. Mais il contribue ensuite à affecter le développement des organes reproducteurs et le remplissage du grain. Globalement, le rendement est bien entendu augmenté par la fertilisation azotée, mais aussi par la pratique d'assec lors des apports d'engrais sur sol non alcalin ou par le repiquage de plants âgés.

4.5 Conclusion

L'impact négatif attendu du pH est finalement modulé par les possibilités de compensation qui peuvent se mettre en place. En effet les composantes du rendement sont affectées seulement pendant la phase de reproduction qui touche surtout le remplissage des grains (poids de mille grains). Pendant la phase précédente, le pH joue plutôt un rôle favorable sur la nutrition azotée et la production de matière sèche en limitant les pertes d'azote dans le système. L'efficience de l'azote serait principalement affectée par des pertes par dénitrification au cours de la première partie du cycle cultural. La vidange de la lame d'eau semble jouer un rôle globalement favorable dans la mesure où la lame d'eau est suffisamment contrôlée pour une remise en eau du bassin dans les trois jours suivant l'apport. Le repiquage de plants âgés pratiqué par les paysans semble correspondre avec une meilleure adaptation aux conditions de sol alcalin et conduit même à une amélioration des performances de la riziculture dans la mesure où il est accompagné par un apport d'azote à la reprise.

En conséquence, les pratiques paysannes semblent correspondre à une adaptation de leur itinéraire technique aux conditions défavorables du milieu. Les principales voies d'amélioration de la conduite des cultures rizicoles à l'Office du Niger concernent tout d'abord la limitation des pertes d'azote par nitrification et dénitrification suite aux apports d'urée. Des conditions plus réductrices au moment du repiquage et des apports d'engrais pourraient être créées par une mise en eau plus précoce des bassins rizicoles ou l'augmentation de l'activité biologique par l'apport de matières organiques. Les apports d'engrais pourraient être conjointement adaptés et fractionnés. D'autres adaptations des itinéraires techniques pourraient être envisagées : vidange des bassins à l'occasion des apports d'urée, raisonnement conjugué de la gestion des pépinières, de l'age des plants au repiquage et de l'apport de fertilisants à la reprise. Enfin, la prévention de la dégradation des propriétés des sols liée à l'augmentation du pH (alcalinisation) reste une priorité pour l'amélioration des performances de la riziculture même si les paysans ont su globalement s'adapter à ces conditions du milieu.

Chapitre 5 : conclusions et perspectives

Chapitre 5 : conclusions et perspectives

5.1 Les acquis de ce travail

L'aridité du climat, l'augmentation du niveau de la nappe et la qualité des eaux du fleuve Niger qui servent à l'irrigation ont contribué à faire évoluer les sols de l'Office du Niger vers des voies alcalines. Les mécanismes de la dégradation dans cette zone sont maintenant bien connus (Marlet & N'diaye, 1998; Dicko, 1999; Condom, 2000; Marlet & N'diaye, 2002) et permettent aujourd'hui d'expliquer son impact relativement limité sur le rendement du riz en relation avec la gestion de la lame d'eau.

Cette étude aura permis de comprendre le fonctionnement du système relativement complexe constitué par le sol, la lame d'eau et la plante dans un contexte de sols alcalins, voire localement très alcalins. En effet, notre objectif était de comprendre les interactions entre les propriétés des sols et les pratiques de gestion de la culture (fertilisation azotée, lame d'eau et repiquage) sur l'alimentation azotée du riz et d'identifier *in fine* des voies d'amélioration de l'efficience de l'azote et du rendement dans les conditions de l'Office du Niger.

Le diagnostic agronomique effectué dans les parcelles de dix paysans de la zone a permis d'identifier trois groupes de parcelles sur la base de la combinaison de deux facteurs pouvant influencer l'élaboration du rendement par leur impact sur le fonctionnement du sol : (i) une situation pédologique en relation avec l'état de dégradation des sols par alcalinisation, variable dans les conditions de l'Office du Niger et (ii) une situation hydraulique en relation avec la qualité de la gestion de la lame d'eau au niveau de la parcelle. Les résultats obtenus montrent que la gestion de la lame d'eau apparaît comme un facteur déterminant, les sols alcalins obtenant de bons résultats lorsque le contrôle de la lame d'eau est satisfaisant. Cette situation apparaît dominante au sein des parcelles étudiées. Les sols alcalins sont par contre pénalisés lorsque le contrôle de la lame d'eau n'est pas effectif. D'un autre côté, certains sols sableux peu alcalin, voire légèrement acides, semblent pénalisés en relation avec une faible fertilité.

Les rendements observés sur ces parcelles sont très variables à l'image de l'ensemble de la zone, 2 à 7 t/ha selon Wopereis et al (1999), et cette variabilité

existe même à l'intérieur d'un groupe de parcelles situé dans une même situation pédo-hydraulique. Les résultats de l'analyse des pratiques des agriculteurs à l'intérieur de chaque groupe révèlent que des conditions défavorables à une bonne efficience des apports d'azote, sont réunies dans certaines parcelles en relation avec des apports d'azote insuffisants ou bien effectué à des dates trop éloignées des stades clés alors que la coïncidence des apports avec ces stades est essentielle pour une bonne efficacité des apports (Kirk & Kronzucker, 2000). Certains paysans ont parfois utilisé des plants âgés de plus de 60 jours (ce qui est très éloigné des recommandations techniques). Les rendements apparaissent comparables à ceux obtenus avec des plants beaucoup plus jeunes lorsque la fertilisation azotée est gérée de façon optimale. Ces pratiques semblent de nature à compenser le stress lié au retard du repiquage.

Les différents facteurs identifiés liés à la nature des sols, à la gestion de lame d'eau, au calendrier de fertilisation azotée ou à l'age des plants ont ensuite fait l'objet d'études au laboratoire et au champ.

Les résultats au laboratoire ont montré à travers deux expérimentations réalisées sur des sols prélevés dans la zone d'étude, le rôle doublement important de la lame d'eau dans la dynamique de l'azote en relation avec l'état de dégradation du sol. Elle joue d'abord un rôle de maintien du pH à des valeurs acceptables pour le riz en conditions alcalines. Ceci est la conséquence d'une augmentation de la pression partielle en gaz carbonique en relation avec le maintien d'une lame d'eau quasi-permanente. Cependant, la lame d'eau favorise les pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac lors de l'apport d'urée ; ces pertes sont plus importantes sur sol alcalin mais demeurent relativement limitées. En l'absence de lame d'eau, les pertes par volatilisation d'ammoniac apparaissent moindre, notamment en raison de l'adsorption de l'azote ammoniacal et de sa nitrification. Les formes nitriques sont ensuite soumises à un processus de dénitrification susceptible d'entraîner des pertes sensiblement plus importantes que celles liées à la volatilisation de NH_3. Ces pertes apparaissent plus importantes sur les sols non alcalins, peut-être en relation avec un activité biologique ou enzymatique réduite dans des conditions de pH alcalin.

Les résultats des essais en station confirment l'effet important de la fertilisation azotée et de la gestion de la lame d'eau obtenu au laboratoire. Ils montrent notamment qu'un assec de courte durée pourrait représenter une solution optimale à la condition essentielle que l'agriculteur puisse assurer avec une sécurité suffisante la remise en eau de sa parcelle dans un bref délai. Ils montrent également que le fractionnement et l'âge des plants au repiquage n'induisent pas de différence significative dans l'élaboration du rendement. Les plants âgés ont une production de biomasse élevée malgré leur handicap lors du tallage par rapport à des plants jeunes. Ceci explique le rendement acceptable obtenu chez les paysans ayant utilisé des plants âgés mais qui ont assuré une bonne gestion de la lame d'eau et des apports d'azote. Cet essai a aussi montré que l'efficience des apports d'engrais azotés était meilleure sur les sols alcalins en relation avec de moindres pertes d'azote par dénitrification. Ces conditions conduisent à un meilleur développement végétatif de la culture. Par contre, le pH semble avoir un effet dépressif durant la phase de mise en place et de remplissage des organes reproducteurs ; cet effet semble néanmoins pouvoir être atténué par une bonne gestion de la lame d'eau sur sols alcalins.

5.2. Proposition pour l'amélioration des performances de la riziculture en sols alcalins.

Ces résultats montrent qu'il existe des voies d'amélioration des performances de la fertilisation qui passent par une meilleure gestion de la lame d'eau et de l'itinéraire technique. Les expérimentations au champ suggèrent qu'il est plus efficace d'apporter l'azote sur un sol en boue contrairement à la pratique couramment utilisée à l'Office du Niger qui consiste à apporter l'azote ou tout autre engrais dans une lame d'eau. Un assec de courte durée pourrait accroître l'efficience des apports d'azote sans induire un accroissement significatif des pertes par dénitrification. Cependant cette pratique ne peut être efficace qu'à la condition essentielle que l'agriculteur puisse assurer avec une sécurité suffisante la remise en eau de sa parcelle dans un bref délai pour éviter à la fois un accroissement des pertes d'azote par dénitrification et un effet préjudiciable du pH sur l'alimentation minérale de la culture et la production de grains. Or la qualité du réseau d'irrigation ou l'étalement des dates de mise en place de la culture peuvent fortement gêner l'application d'un tour d'eau adéquat. Ceci

implique l'amélioration de la gestion de l'eau à une échelle supérieure à celle de la parcelle de l'agriculteur.

Des progrès significatifs peuvent également être réalisés dans le mode de gestion en fonction de l'âge des plants au repiquage, ce dernier facteur étant difficile à optimiser car il résulte de contraintes de gestion à l'échelle de l'exploitation. Sur des plants repiqués jeunes (21 à 30 jours après semis ou stade 3-4 feuilles) l'apport d'une petite quantité d'azote (20 à 30 kg/ha) au début de l'épiaison est favorable à la réalisation du potentiel de rendement de la culture permis par ce repiquage précoce. En cas de repiquage de plants âgés (jusqu'à 60 jours) il est encore possible de réaliser un rendement correct (5 à 6t/ha obtenus dans les parcelles suivies) mais il faut alors apporter au moins 75 kg d'azote/ha à l'IP. L'apport d'azote aux stades clés a permis d'améliorer le CAU surtout sur les plants âgés qui ont reçu de l'azote seulement à l'initiation paniculaire.

5.3. Limites et Perspectives

Cette étude n'a pas permis d'établir avec une précision suffisante le bilan d'azote dans le système sol-eau-plante surtout en ce qui concerne la part exacte de la dénitrification qui n'a pas fait l'objet de mesures directes. Les observations au laboratoire montrent des teneurs importantes en nitrates sur le sol non alcalin. Ce nitrate est tout à fait susceptible de pertes par dénitrification qui se mettent en place en conditions réductrices et qui pourraient représenter l'essentiel des pertes d'azote hors du système sol-eau-nappe, par rapport à la lixiviation ou à la volatilisation d'ammoniac. Des mesures peuvent être effectuées au champ grâce à l'utilisation d'un dispositif approprié (Majumbar et al, 2000).

Il conviendra également d'améliorer la méthode de diagnostic du statut azoté du riz par l'adaptation d'une courbe de teneur critique aux conditions de l'Office du Niger et notamment aux variétés qui y sont cultivées. En effet l'indice de nutrition azotée a été calculé sur la base d'une courbe issue de la littérature et obtenue sur la variété de riz *«IR72 »* différente de celle utilisée dans cette étude (*Kogoni91-1*) ; cela pourrait expliquer les faibles valeurs d'INN obtenues dans nos essais au champ. Cette méthode est trop complexe pour être utilisée pour le pilotage de la fertilisation par les agriculteurs mais elle serait utile pour caler

d'autres méthodes plus opérationnelles comme les chartes de couleur utilisées par l'IRRI (Siband *et al.*, 2001).

Les paysans de la zone semblent être en mesure de maîtriser les conditions de production du riz sur les sols alcalins avec une maîtrise appropriée de la lame d'eau et du calendrier cultural. Ces sols semblent même plus favorables au développement végétatif de la culture du riz en relation avec une meilleure efficience de la fertilisation azotée. Dans le même temps, les sols alcalins montrent un impact défavorable sur la production de grains. Toute mesure visant à assurer la désalcalinisation des sols ou la diminution du pH in situ par une gestion efficace du lessivage ou un accroissement de l'activité biologique reste nécessaire pour l'obtention d'une production de riz plus élevée.

Enfin les résultats obtenus dans ce travail ouvrent la voie d'une approche de modélisation du fonctionnement du système sol-riz-lame d'eau sur sols alcalins à l'Office du Niger, en relation avec les itinéraires techniques et les états du milieu (Rapidel *et al.*, soumis).

Bibliographie

Affholder, F. and E. Scolpel (2001). Modèle de culture et diagnostic agronomique régional. Modélisation des agrosystèmes et aide à la décision. E. Malezieux, G. Trébuil and M. Jaeger, Cirad:Inra**:** 107-125.
Al Droubi, A., J. L. Grondin, B. Fritz and Y. Tardy (1978). "Calcul des équilibres dans le système CaCO3-H2O-CO2. Rappel des conditions de dissolution et de précipitation de la calcite." Sci. géol. Bull **31**(4): 195-202.
Appelo, C. A. J. and D. Postma (1996). Geochemistry, groundwater and pollution**:** 536.
Baize, D. (1998). Guide pratique des analyses courantes en pédologie. Paris, Inra.
Barral, J. P. and M. K. Dicko (1996). La dégradation des sols à l'Office du Niger. Niono-Mali, PSI/MALI**:** 40.
Bertrand, R. (1985). Sodisation et alcalinisation des sols de l'Office du Niger (Mali), CIRAD-IRAT**:** 25pp.
Bertrand, R., B. Keïta and M. K. N'diaye (1993). "La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sud-sahariennes (cas de l'Office du Niger au Mali)." Cahiers Agricultures **2**: 318-329.
Bouyer, S. and B. Dabin (1963). "Etudes pédologiques du Delta central du Niger." l'Agronomie Tropicale **18**: 1300-1304.
Cartelat, A., Z. G. Cerovic, Y. Goulas, S. Meyer, C. Lelarge, J.-L. Prioul, A. Barbottin, M.-H. Jeuffroy, P. Gate, G. Agati and I. Moya (2004). "Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (Triticum aestivum L.)." Field Crops Research **In Press, Corrected Proof**.
Cassman, K. G., S. Peng, D. C. Olk, J. K. Ladha, W. Reichardt, A. Dobermann and U. Singh (1998). "Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems." Field Crops Research **56**(1-2): 7-39.
Chowdary, V. M., N. H. Rao and P. B. S. Sarma (2004). "A coupled soil water and nitrogen balance model for flooded rice fields in India." Agriculture, Ecosystems & Environment **103**(3): 425-441.
Condom, N. (2000). Analyse et modélisation couplée des processus hydro-géochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali). Montpellier. Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier**:** 189 et annexes.
Coulibaly, M. M. B. (2002). L'évolution des variétés de riz et des techniques culturales. L'Office du Niger, grenier à riz du Mali. P. Bonneval, M. Kuper and J.-P. Tonneau, Cirad/karthala**:** 122-124.
Dabin, B. (1951). "Contribution à l'étude des sols du delta central nigérien." l'Agronomie Tropicale **6**(11-12): 606-633.
Dicko, M. (1999). Etude de l'impact des mécanismes bio-géochimiques sur le bilan de l'alcalinité des sols submergés. Cas d'un sol sableux de l'Office du Niger-Mali. DEA national de Science du sol, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier**:** 19 et annexes.
Dingkuhn, M., A. Sow, A. Samb, S. Diack and F. Asch (1995). "Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel -- I. Photothermal and micro-climatic responses of flowering." Agricultural Systems **48**(4): 385-410.

Dobermann, A. and T. Fairhust (2000). Rice : Nutrient Disorders and Nutrient Management, PPI & IRRI**:** 191.
Dobermann, A. and C. Witt (1999). The potential impact of crop intensification on carbon and nitrogen cycling in intensive rice systems. Carbon an Nitrogen Dynamics in Flooded Soils, Los Banos, Philippines, IRRI.
Donovan, C., M. C. S. Wopereis, D. Guindo and B. Nebie (1999). "Soil fertility management in irrigated rice systems in the Sahel and Savanna regions of West Africa: Part II. Profitability and risk analysis." Field Crops Research **61**(2): 147-162.
Dore, T., M. Sebillotte and J. M. Meynard (1997). "A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield." Agricultural Systems **54**(2): 169-188.
Edeling, M. E. (1968). "The Dumas methods for nitrogen in feeds." JAOAC(51): 766p.
Fageria, N. K. and V. C. Baligar (2001). "Lowland rice respond to nitrogen fertilisation." Soil sci and Plant Anal. **32**(9-10): 1405-1429.
Fillery, I. R. P. and S. K. DeDatta (1986). "Ammonia Volatilization from Nitrogen Sources Applied to Rice Fields: I. Methodology, Ammonia fluxes, and Nitrogen-15 Loss." Soil Sci Am J. **50**: 80-86.
Freney, J. R., R. Leuning, J.R. Simpson, O.T. Denmead and W. A. Muirhead (1885). "Estimating Ammonia Volatilization From Flooded Rice Fields by Simplified Techniques." Soil Sci Am J. **49**: 1049-1085.
Guiraud (1984). Contribution du marquage isotopique à l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux dans les écosystèmes sol-plante., Université Pierre et Marie Curie, Paris VI**:** pp 725-730.
Haefele, S. M., M.S.C.Wopereis, M.K. N'Diaye, S. E. Barro and a. M. O. Isselmou. (2003). "A framework to improve fertilizer recommendations for irrigated rice in West Africa." Agricultural Systems. **76**(1): 313-335.
Inko, A., P. Frenzel and a. R. Conrad (1998). "Denitrification coupled to nitrification in the rhizosphere of rice." Soil Biology and Biochemistry **30**(4): 509-515.
Jamin, J.-Y. (1994). De la norme à la diversité : intensification rizicole face à la diversité paysanne dans les périmètres irrigués sahéliens : utilité d'une typologie à l'Office du Niger (Mali). Agronomie. Paris-Grignon, INA, INA-PG**:** 2 vol 318.
Jensen, E. S. (1994a). "Dynamics of mature pea residue nitrogen turnover in unplanted soil under field conditions." Soil Biology and Biochemistry **26**: 455-464.
Jensen, E. S. (1994b). "Availability of nitrogen 15N-labeled mature pea residue to subsequent crops in field." Soil Biology and Biochemistry **26**: 465-472.
Keita, B., B. Kounkandi and L. Dioni (1991). Etude morphopédologique du kala inférieur au 1/20000, IER/MALI**:** 77 pages + annexes.
Kirk, G. J. D. and H. J. Kronzucker (2000). Nitrogen uptake by rice roots. Carbon and Nitrogen Dynamics in Flooded Soils. G. J. D. a. D. C. O. Kirk, IRRI.
Legoupil, J. C., C. Dancette, P. Godon, I. M. Maïga and M. K. N'diaye (1999). Pour un Développement Durable de l'Agriculture Irriguée dans la Zone Soudano-Sahélienne. Synthèse des résultats du Pôle Régional de Recherche sur les Systèmes Irrigués (PSI/CORAF). Dakar-Sénégal.
Lemaire, G. and F. Gastal (1998). N uptake and distribution in plant canopies. G. LEMAIRE. Heidelberg. Heidelberg, Allemagne**:** 3-43.

Marcel, M. L. (1997). Analyse bibliographique concernant: hydrolyse de l'urée et volatilisation d'ammoniac. Méthodes d'étude, cinétiques des réactions, influence des facteurs édaphiques, techniques et environnementaux.
Marlet, S. and M. K. N'diaye (1998). Evolution temporelle et variabilité spatiale des indicateurs de la dégradation des sols par alcalinisation et sodisation à l'Office du Niger. Tome 1: Synthèse des travaux. Mali, IER. PSI-Mali.
Marlet, S. and M. K. N'diaye (2002). Des risques d'alcalinisantion liés à l'irrigation et aux pratiques culturales. L'Office du Niger, grenier à riz du Mali. P. Bonneval, M. Kuper and J.-P. Tonneau, Cirad/Karthala**:** 163-167.
Marnotte, P., S. DIALLO, I. KANE, S. SARRA and A. SY (1999). Gestion de l'enherbement en riziculture irrguée., Dakar-Sénégal.
Mikkelsen, D. S., S. K. De Datta and W. N. Obcema (1978). "Ammonia volatilization losses from flooded rice soils. Contribution of Dept. of Agron., The IRRI." Soil Sci Am J. **42**(725-730).
Narteh, L. T. and K. L. Sahrawat (1997). "Potentially mineralizable nitrogen in West African lowland rice soils." Geoderma **76**(1-2): 145-154.
Narteh, L. T. and K. L. Sahrawat (1999). "Influence of flooding on electrochemical and chemical properties of West African soils." Geoderma **87**(3-4): 179-207.
Narteh, L. T. and K. L. Sahrawat (2000). "Ammonium in solution of flooded West African soils." Geoderma **95**(3-4): 205-214.
N'diaye, M. K., S. Marlet and M. Dicko (2002). Maîtrise de l'irrigation et du drainage en riziculture irriguée et désalcalinisation des sols à l'Office du Niger. Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation., Montpellier, France, CEMAGREF, CIRAD, IRD, Cédérom du CIRAD.
Ocio, J. A., P. C. Brooks and D. S. Jenkinson (1991). "Field incorporation of straw and its effects on soil microbial biomass and inorganic N." Soil Biology and Biochemistry(23): 171-176.
Orsini, L. and J. C. Remy (1976). "Utilisation de chlorure de Cobaltihexamine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange cationique et des bases échangeables." Bulletin AFES(4): 269-275.
Peng, S. and K. G. Cassman (1998). "Upper thresholds of nitrogen uptake rates and associated fertilizer efficiencies in irrigated rice." Agronomy journal **90**: 178-185.
Peng, S. and K. G. Cassman (1998). "Upper thresholds of nitrogen uptake rates and associated N fertilizer efficiencies in irrigated rice."
Peng, S., F. V. Garcia, R. C. Laza and K. G. Cassman (1993). "Adjustment of specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration." Agronomy Journal **85**: 987-990.
Ponamperuma, F. N. (1972). "The chemistry of submerged soils." Advances in Agronomy **24**: 29-96.
Poussin, J. C., M.S.C.WOpereis, D.Derbouzie and J.L.Maeght (2003). "Determinants of irrigated rice in the Senegal River valley." European journal of Agronomy(19): 341-356.
Puard, M., P. Couchat and G. Lasceve (1989). "Etude des mécanismes d'adaptation du riz (*Oriza sativa L.*) aux contraintes du milieu." l'Agronomie Tropicale **44**(3): 165-177.
Rao, D. L. N. and L. Batra (1983). "Ammonia volatilization from applied nitrogen in alkali soils." Plant and soil **70**: 219-228.

Rapidel, B., C. Défèche, B. Traoré, J. Lançon and W. Wery (soumis). "In field development of a conceptual model for crop functionning and management: case of Cotton in Southern Mali." European journa of Agronomy (soumis).
Reddy, K. R., W. H. Patrick and C. W. Lindau (1989). "Nitrification-denitrification at the plant root-sediment interface in wetland." Limnology an Oceanography **34**: 1004-1013.
Sahrawat, K. L. and F. N. Ponamperuma (1978). "Measurement of Exchangeable NH4+ in Tropical Rice Soils." Soc. Am. J. **42**: 282-283.
Savant, N. K., Angela F. James and G. H. McClellan (1985). "Effect of Soil Submergence on urea Hydrolyis." Soil Sci. **140**(2): 81-87.
Seitzinger, S. P., L. P. Nielsen, J. Cafrey and P. B. Christensen (1993). "Denitrification measurmement in aquatic sediments : a comparison of three methods." Biochemistry **23**: 147-167.
Siband, P., C. Loyce, C. Witt and M. Dingkuhn (2001). Evaluer le statut azoté du riz. Modélisation des agrosystèmes et aides à la décision. E. Malezieux, G. Trébuil and J. Marc. Paris, INRA-CIRAD**:** 95-106.
Singandhupe, R. B. and R. K. Rajput (1989). "Ammonia volatilization from rice fields in alkaline soil as influenced by soil moisture and nitrogen." Journal of Agriculture Science Camb. **112**: 185-190.
Singh, P., A. K. Verma, N. N. Pathak and a. J. C. Biswas (1998). "Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium- and long-duration rice." Field Crops Research **58**(1): 35-53.
Tadano, T. and S. Yoshida (1978). "Chemical changes in submerged soils and their effect on rice growth." 165-177.
Tanaka, A., S. Patnaik and C. T. Abichandani (1959). "studies on nutrition of the rice plant. Part V. Comparative effect of ammonium and nitrate nitrogen on growth yield and nitrogen uptake by the rice plant." Proc. Indian Acad. Sci., Sect. B. **46**(6): 386-396.
Tilman, D., K. G. Cassman, P. A. Matson, R. Naylor and S. Polasky (2002). "Agriculture sustainability and intensive production practices." Nature **418**: 671-677.
Toujan, M. (1980). Aménagements hydro-agricole dépendant du canal du sahel. Evolution des sols irrigués., SOGREAH**:** 16.
Tyagi, N. (1996). Salinity management in iriigated agriculture. Sustanability of irrigated agriculture. L. S. Pereira**:** 345-358.
Valenza, A. (1996.). Rôle des eaux souterraines et d'irrigation dans les processus de salinisation-alcalinisation des sols en zone sahélienne: cas du Delta Intérieur du Niger (MALI). Géologie. Montpellier., Université des Sciences du Languedoc.
Valles, V., R. Bertrand, F. Bourgeat and M. K. N'diaye (1987). "Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques. Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l'Oued Medjerdah (Tunisie)." Agronomie Tropicale **44**(3): 157-163.
Valles, V. and F. Bourgeat (1988). "Geochemical determination of the gypsum requirement of cultivated sodic soils. I. Development of the thermodynamic model GYPSOL simulating the irrigation water-soil chemical interaction." Arid Soil Research and restauration **44**(3): 157-163.
Van Diest, A. (1988). "Volatilisation de l'ammoniaque à partir des sols inondés et ses conséquences pour les rendements de riz." Bulletin de la commission internationale du riz **37**: 1-7.

Van Hoorn, J. W. (1992). Evaluation de la première phase au sujet de l'identification des problèmes d'alcalinisation/salinisation des sols à l'Office du Niger et proposition pour une deuxième phase d'études et essais., Université agronomique de Wageningen**:** 27.

Wopereis, M. C. S., C. Donovan, B. Nebié, D. Guindo and M. K. N'diaye (1999). "Soil fertility management in irrigated rice systems in the Sahel and Savanna regions. Part I. Agronomic analysis." Field Crops Research **61**: 125-145.

Yoshida, S. (1981). Fundamentals of rice crop science, IRRI.

Zhu, J. G., G. Liu, Y. Han, Y.L. Zhang and G. X. Xing (2003). "Nitrate distribution and denitrification in the saturated zone of paddy field under rice/wheat rotation." Chemosphere(50): 725-732.

ANNEXE

Tableau A.13 : Résultats des analyses de sol (échantillon composite de cinq prélèvements)

		GRANULOMETRIE					pH		fertilité				
Parc.	Profondeur	Argiles	Limons fins	Limons gros.	Sables fins	Sables gros.	pH H2O	pH KCl	Matière org.	Carbone org.	Azote total	C/N	Pass
		%							%		g/kg		mgP/Kg
A1	0-10	26,0	5,5	13,6	38,3	16,7	6,95	5,95	1,17	0,68	0,58	11,72	9,70
A1	10-30	40,8	7,2	13,7	29,2	9,0	8,30	6,65	0,78	0,45	0,37	12,16	6,20
A2	0-10	36,8	5,7	14,9	33,0	9,6	7,50	6,15	1,47	0,85	0,73	11,64	7,90
A2	10-30	38,5	6,1	15,1	31,2	9,1	7,95	6,65	0,78	0,45	0,38	11,84	8,10
B1	0-10	22,0	5,4	17,2	41,8	13,6	6,90	5,70	1,29	0,75	0,66	11,36	18,50
B1	10-30	33,2	6,0	13,5	36,9	10,3	7,70	6,20	0,62	0,36	0,31	11,61	8,05
B2	0-10	29,3	5,1	15,2	39,1	11,3	7,65	6,25	0,58	0,34	0,30	11,30	4,95
B2	10-30	25,0	5,1	15,3	43,5	11,1	7,20	5,95	1,05	0,61	0,55	11,02	10,90
C1	0-10	19,8	8,6	18,0	37,9	15,6	6,15	4,45	1,09	0,63	0,54	11,67	8,05
C1	10-30	25,2	8,3	15,8	34,8	15,9	6,70	4,90	0,91	0,53	0,45	11,78	8,50
C2	0-10	33,3	9,8	16,0	28,1	12,8	7,75	6,35	0,97	0,56	0,47	11,91	10,20
C2	10-30	36,0	10,7	13,8	27,0	12,5	8,10	6,65	0,81	0,47	0,39	12,05	9,60
D1	0-10	36,0	6,7	12,6	27,1	17,6	6,05	4,55	1,45	0,84	0,73	11,51	13,00
D1	10-30	40,9	6,4	11,2	25,1	16,4	7,10	5,45	0,90	0,52	0,45	11,56	9,25
D2	0-10	35,0	6,2	12,9	30,9	15,1	5,55	4,00	1,17	0,68	0,63	10,79	12,15
D2	10-30	38,3	5,6	11,7	27,6	16,8	7,00	5,05	0,69	0,4	0,39	10,26	8,20
E1	0-10	11,6	3,8	15,1	46,1	23,5	8,50	6,80	0,81	0,47	0,4	11,75	6,40
E1	10-30	14,1	5,0	15,3	42,2	23,3	8,60	6,95	0,69	0,4	0,35	11,43	5,75
E2	0-10	11,7	5,0	17,6	46,3	19,4	8,20	6,75	1,17	0,68	0,57	11,93	10,70
E2	10-30	16,6	5,7	16,8	44,0	16,8	9,25	7,65	0,55	0,32	0,25	12,80	7,45
F1	0-10	12,0	5,0	13,1	38,6	31,3	6,10	4,05	0,76	0,44	0,38	11,58	22,50
F1	10-30	13,9	3,4	13,2	37,1	32,4	5,70	4,40	0,59	0,34	0,29	11,72	11,00
F2	0-10	10,2	4,8	13,0	39,7	32,3	5,20	4,00	0,69	0,4	0,35	11,43	26,00
F2	10-30	16,2	2,8	12,8	32,4	35,7	5,55	4,40	0,48	0,28	0,23	12,17	13,10
G1	0-10	7,4	4,1	13,7	47,1	27,8	4,90	3,90	0,67	0,39	0,35	11,14	10,00
G1	10-30	11,4	3,0	15,0	44,9	25,7	5,75	4,55	0,47	0,27	0,23	11,74	4,90
H1	0-10	60,3	9,1	9,9	13,7	7,1	7,40	6,05	1,74	1,01	0,77	13,12	33,65
H1	10-30	59,9	8,8	9,6	13,6	8,2	8,00	6,65	1,02	0,59	0,46	12,83	18,35
H2	0-10	63,2	9,3	9,1	12,2	6,2	7,35	6,00	1,38	0,8	0,58	13,79	30,20
H2	10-30	63,7	8,8	8,8	12,5	6,3	7,90	6,50	0,88	0,51	0,4	12,75	15,95
I1	0-10	60,7	9,6	12,5	12,1	5,0	7,55	6,20	1,79	1,04	0,77	13,51	33,35
I1	10-30	39,3	32,6	11,9	11,6	4,6	8,00	6,65	1,19	0,69	0,54	12,78	21,25
I2	0-10	64,6	9,3	10,6	10,4	5,1	8,35	6,90	1,03	0,6	0,44	13,64	18,45
I2	10-30	65,6	9,3	9,6	11,0	4,5	8,15	6,65	0,90	0,52	0,36	14,44	14,10
J1	0-10	5,9	3,6	13,3	43,7	33,5	4,70	3,85	0,66	0,38	0,29	13,10	6,55
J1	10-30	8,7	3,3	12,8	40,5	34,6	4,85	4,05	0,45	0,26	0,21	12,38	5,80
J2	0-10	3,6	2,6	14,6	43,8	35,5	4,75	3,90	0,48	0,28	0,22	12,73	4,00
J2	10-30	10,0	1,5	12,8	41,4	34,2	5,50	4,60	0,38	0,22	0,19	11,58	2,25

Tableau A.13 (suite)

		Complexe d'échange Méthode Co(NH3)6 Cl3							somme			
Parc	Prof.	Ca éch	Mg éch	K éch	Na éch	Al éch	Mn éch	H éch	Ca+Mg+K+Na	CEC	Saturation	pH extrait
		méq/100g										
A1	0-10	5,52	2,81	0,26	0,75	0,00	0,03	0,00	9,38	12,91	0,73	5,99
A1	10-30	10,72	5,49	0,21	1,43	0,00	0,00	0,00	17,85	21,61	0,83	6,88
A2	0-10	10,23	4,74	0,23	0,79	0,00	0,01	0,00	16,01	19,96	0,80	6,64
A2	10-30	11,06	4,99	0,22	0,78	0,00	0,01	0,00	17,06	20,85	0,82	6,75
B1	0-10	4,33	2,78	0,27	1,81	0,00	0,03	0,00	9,24	12,53	0,74	6,08
B1	10-30	6,96	5,13	0,24	1,77	0,00	0,02	0,00	14,12	17,37	0,81	6,52
B2	0-10	5,58	3,37	0,13	1,43	0,00	0,01	0,00	10,53	11,73	0,90	6,35
B2	10-30	5,13	3,24	0,14	1,62	0,00	0,02	0,00	10,15	10,82	0,94	6,20
C1	0-10	2,97	1,26	0,09	0,58	0,02	0,07	0,03	5,01	6,56	0,76	4,88
C1	10-30	3,82	1,72	0,11	0,60	0,01	0,07	0,02	6,36	8,43	0,75	4,97
C2	0-10	6,75	3,53	0,25	1,21	0,00	0,02	0,00	11,76	13,91	0,85	6,79
C2	10-30	6,06	3,39	0,23	1,69	0,00	0,01	0,00	11,38	13,39	0,85	6,82
D1	0-10	5,68	2,39	0,43	0,65	0,04	0,10	0,04	9,33	11,91	0,78	4,74
D1	10-30	7,77	2,95	0,33	1,21	0,00	0,03	0,00	12,29	15,11	0,81	5,99
D2	0-10	4,89	2,07	0,15	0,39	0,34	0,11	0,19	8,12	10,51	0,77	4,03
D2	10-30	6,33	2,54	0,17	0,58	0,00	0,03	0,01	9,66	15,37	0,63	5,57
E1	0-10	3,10	0,70	0,21	1,61	0,00	0,01	0,00	5,62	8,26	0,68	6,76
E1	10-30	3,66	0,96	0,19	1,32	0,00	0,01	0,00	6,15	7,88	0,78	6,80
E2	0-10	3,78	0,61	0,13	1,49	0,00	0,02	0,00	6,02	7,42	0,81	6,93
E2	10-30	5,24	0,76	0,17	2,77	0,00	0,00	0,00	8,95	10,37	0,86	8,16
F1	0-10	1,73	0,76	0,07	0,09	0,14	0,05	0,09	2,93	3,57	0,82	4,34
F1	10-30	2,11	0,99	0,11	0,10	0,03	0,05	0,05	3,43	4,07	0,84	4,64
F2	0-10	1,27	0,56	0,07	0,09	0,16	0,03	0,09	2,27	2,76	0,82	4,35
F2	10-30	2,27	1,11	0,11	0,11	0,03	0,06	0,06	3,74	4,40	0,85	4,56
G1	0-10	1,30	0,41	0,06	0,08	0,30	0,03	0,13	2,32	2,78	0,83	4,18
G1	10-30	2,27	0,81	0,08	0,09	0,01	0,06	0,03	3,35	4,08	0,82	4,80
H1	0-10	14,58	4,68	0,51	0,74	0,00	0,02	0,00	20,53	25,03	0,82	6,50
H1	10-30	14,81	5,24	0,29	1,13	0,00	0,00	0,00	21,48	24,68	0,87	6,89
H2	0-10	15,24	5,59	0,19	0,79	0,00	0,02	0,00	21,82	25,53	0,85	6,46
H2	10-30	14,96	5,83	0,19	1,36	0,00	0,00	0,00	22,34	25,67	0,87	6,80
I1	0-10	14,91	5,26	0,22	1,28	0,00	0,01	0,00	21,68	25,26	0,86	6,76
I1	10-30	14,60	5,58	0,20	1,52	0,00	0,00	0,00	21,90	26,07	0,84	6,90
I2	0-10	15,35	6,30	0,21	1,88	0,00	0,00	0,00	23,74	27,39	0,87	7,12
I2	10-30	15,29	6,59	0,25	1,88	0,00	0,00	0,00	24,01	26,92	0,89	7,08
J1	0-10	0,57	0,21	0,16	0,08	0,33	0,01	0,13	1,49	1,81	0,83	4,19
J1	10-30	1,36	0,51	0,08	0,09	0,12	0,07	0,11	2,33	2,66	0,88	4,25
J2	0-10	0,89	0,32	0,06	0,10	0,17	0,04	0,11	1,70	1,95	0,87	4,25
J2	10-30	1,81	0,70	0,11	0,08	0,01	0,06	0,03	2,78	3,27	0,85	4,88

Tableau A.13 (suite)

		Bilan ionique extrait 1/5										
Parc	Prof.	Ca	Mg	K	Na	Cl	S-SO4	N-NO3	HCO3	pH	CE	
		me/100g									µS/cm	ESP
A1	0-10	0,07	0,09	0,07	0,51	0,15	0,14	0,11	0,29	6,37	131	6
A1	10-30	0,09	0,06	0,02	0,58	0,07	0,08	0,09	0,60	7,74	152	7
A2	0-10	0,16	0,14	0,04	0,45	0,08	0,17	0,06	0,41	7,00	131	4
A2	10-30	0,20	0,11	0,02	0,46	0,08	0,12	0,08	0,48	7,57	162	4
B1	0-10	0,07	0,09	0,05	0,83	0,12	0,66	0,08	0,20	6,65	234	14
B1	10-30	0,09	0,12	0,04	0,82	0,16	0,36	0,13	0,21	7,23	204	10
B2	0-10	0,06	0,06	0,03	0,60	0,16	0,27	0,09	0,25	7,13	145	12
B2	10-30	0,06	0,05	0,02	0,78	0,20	0,39	0,25	0,23	6,84	223	15
C1	0-10	0,04	0,07	0,04	0,28	0,05	0,09	0,08	0,14	5,63	57	9
C1	10-30	0,03	0,04	0,02	0,31	0,05	0,10	0,13	0,13	5,75	73	7
C2	0-10	0,06	0,05	0,03	0,59	0,07	0,11	0,07	0,57	7,02	144	9
C2	10-30	0,04	0,05	0,03	0,67	0,03	0,13	0,09	0,53	7,64	159	13
D1	0-10	0,03	0,04	0,03	0,31	0,06	0,10	0,08	0,11	5,63	73	5
D1	10-30	0,05	0,07	0,05	0,39	0,08	0,11	0,08	0,19	6,21	81	8
D2	0-10	0,02	0,03	0,02	0,17	0,05	0,06	0,08	0,15	4,93	44	4
D2	10-30	0,03	0,03	0,02	0,31	0,12	0,05	0,14	0,15	6,42	86	4
E1	0-10	0,15	0,27	0,17	0,83	0,11	0,08	0,10	0,57	8,40	158	20
E1	10-30	0,06	0,07	0,05	0,70	0,05	0,06	0,08	0,60	8,06	146	17
E2	0-10	0,13	0,04	0,03	0,98	0,07	0,08	0,10	1,05	7,40	220	20
E2	10-30	0,05	0,01	0,02	1,46	0,07	0,10	0,05	1,68	9,10	312	27
F1	0-10	0,02	0,02	0,01	0,07	0,03	0,03	0,05	0,03	5,03	30	2
F1	10-30	0,02	0,02	0,02	0,07	0,03	0,03	0,05	0,06	5,34	29	3
F2	0-10	0,02	0,02	0,02	0,08	0,04	0,03	0,06	0,05	5,04	33	3
F2	10-30	0,02	0,02	0,02	0,07	0,06	0,02	0,05	0,04	5,20	30	2
G1	0-10	0,05	0,02	0,02	0,07	0,13	0,03	0,11	0,04	4,72	46	3
G1	10-30	0,03	0,02	0,02	0,07	0,04	0,02	0,06	0,05	5,59	30	2
H1	0-10	0,17	0,07	0,03	0,37	0,07	0,12	0,04	0,49	6,80	130	3
H1	10-30	0,18	0,08	0,02	0,47	0,06	0,14	0,06	0,59	7,40	151	5
H2	0-10	0,14	0,07	0,01	0,36	0,05	0,07	0,06	0,50	6,80	119	3
H2	10-30	0,12	0,06	0,01	0,53	0,05	0,09	0,12	0,57	7,41	150	5
I1	0-10	0,17	0,08	0,02	0,55	0,11	0,08	0,04	0,70	6,98	160	5
I1	10-30	0,14	0,07	0,01	0,62	0,12	0,06	0,07	0,73	7,49	167	6
I2	0-10	0,12	0,06	0,01	0,71	0,13	0,11	0,04	0,74	7,78	184	7
I2	10-30	0,11	0,06	0,01	0,71	0,11	0,15	0,05	0,70	7,57	180	7
J1	0-10	0,04	0,02	0,07	0,09	0,07	0,04	0,15	0,01	4,58	65	5
J1	10-30	0,08	0,04	0,03	0,08	0,13	0,02	0,12	0,02	5,13	70	3
J2	0-10	0,06	0,03	0,02	0,10	0,06	0,02	0,17	0,05	4,74	62	5
J2	10-30	0,04	0,03	0,03	0,07	0,05	0,02	0,09	0,03	5,43	39	2

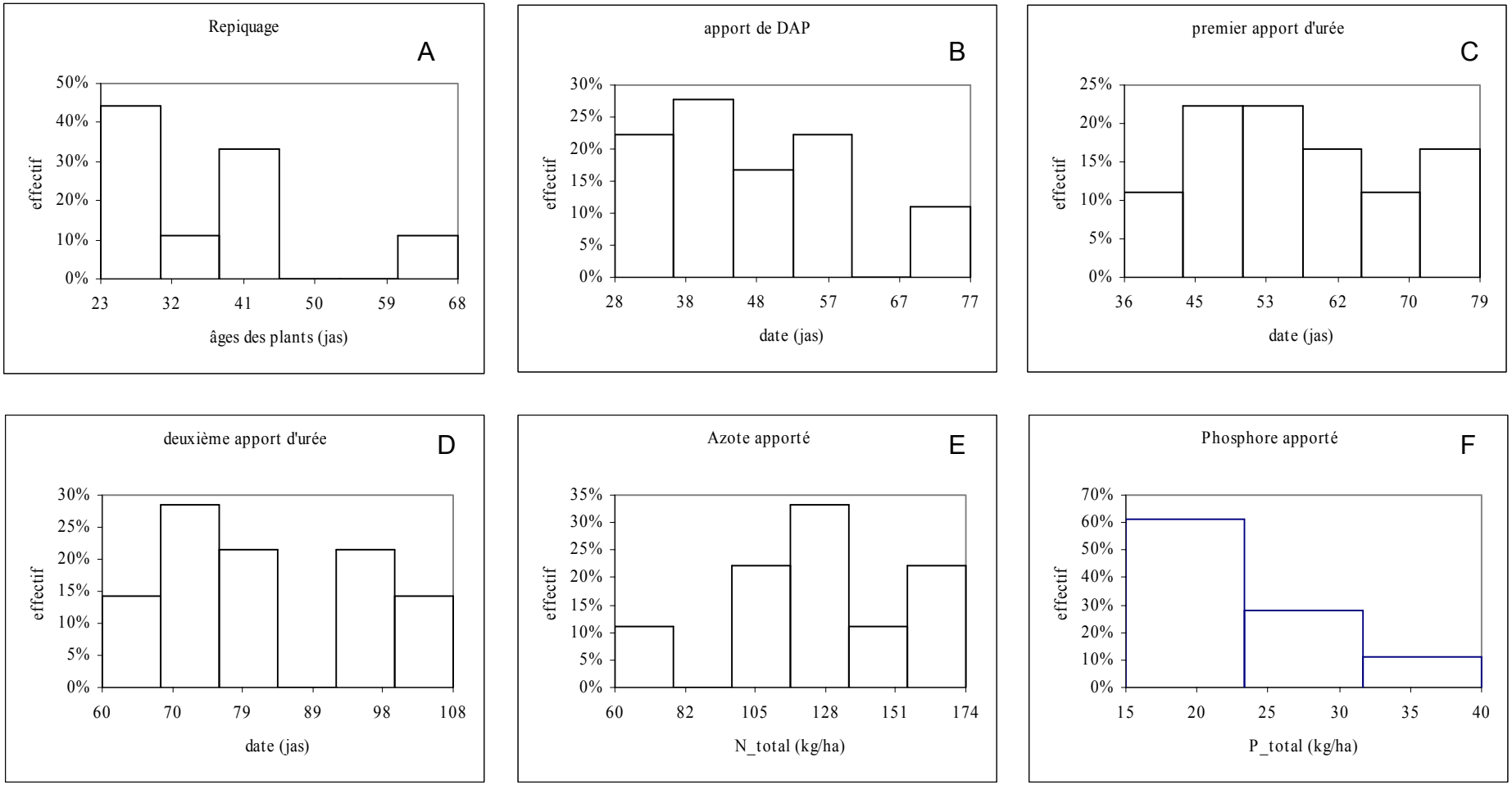


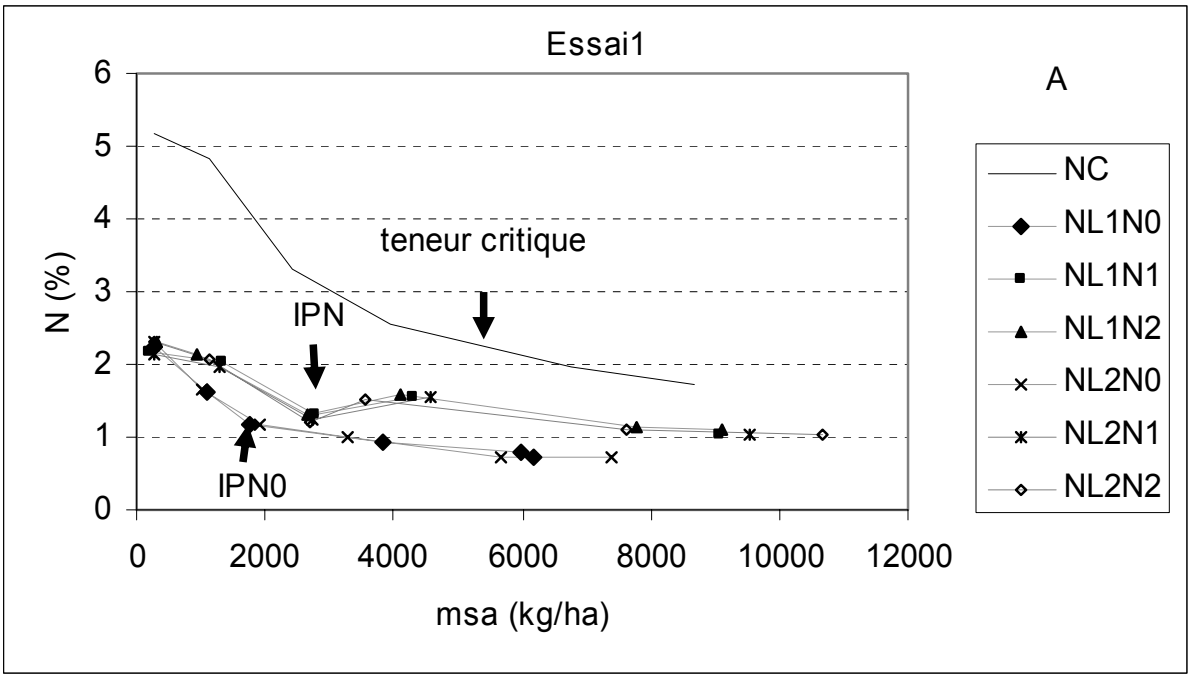
Figure A.83 : variabilité des pratiques chez les paysans suivis.

Activités concernant le repiquage (A) les dates d'apports de DAP (B) du premier apport d'urée (C) du deuxième apport d'urée (D) en jours après repiquage et les quantités d'azote (E) et de phosphore (F) apportées.

Tableau A.14 : simulation de la croissance du riz et recommandations pour les activités à l'aide de Ridev pour les parcelles suivies.

Flo = floraison 50% ; Mat = maturité physiologique ; Stf : stérilité due au froid ; Stc : stérilité due à la chaleur ; Rep : repiquage ; Hrbc : application herbicide ; Eng1 : engrais 1 (P+50%N) ; Dshb : désherbage manuel ; Eng2 : engrais 2 (50%N) Drng : drainage avant récolte.

Groupes paysans	Parcelles suivies	Semis pépinière	Dates des stades (jours après semis) et taux de stérilité				Recommandations sur les pratiques (jour après semis)					
			Flo	Mat	Stf (%)	Stc (%)	Rep	Hrbc	Rng1	Dshb	Eng2	Drng
S1	F2	25-juin	101	133	0	0	20	35	38	69	71	116
	G1	21-juin	101	133	0	0	20	35	38	69	71	116
	G2	21-juin	101	133	0	0	20	35	38	69	71	116
S2	F1	11-juin	101	132	0	0	20	35	38	69	71	116
	J1	26-juin	101	134	0	0	20	35	38	69	71	116
	J2	26-juin	101	134	0	0	20	35	38	69	71	116
S3	A2	21-juin	101	133	0	0	20	35	38	69	71	116
	C1	25-juin	101	133	0	0	20	35	38	69	71	116
	C2	25-juin	101	133	0	0	20	35	38	69	71	116
	D1	25-mai	102	133	0	0	20	35	38	70	72	117
	D2	25-mai	102	133	0	0	20	35	38	70	72	117
	H1	23-juin	101	143	0	0	20	35	38	69	71	116
	H2	23-juin	101	143	0	0	20	35	38	69	71	116
	I1	22-juin	101	133	0	0	20	35	38	69	71	116
	I2	22-juin	101	133	0	0	20	35	38	69	71	116
S4	A1	23-juin	101	132	0	0	20	35	38	69	71	116
	E1	07-jui	101	135	0	0	20	35	38	69	71	116
	E2	23-jui	101	143	0	0	20	35	38	69	71	116



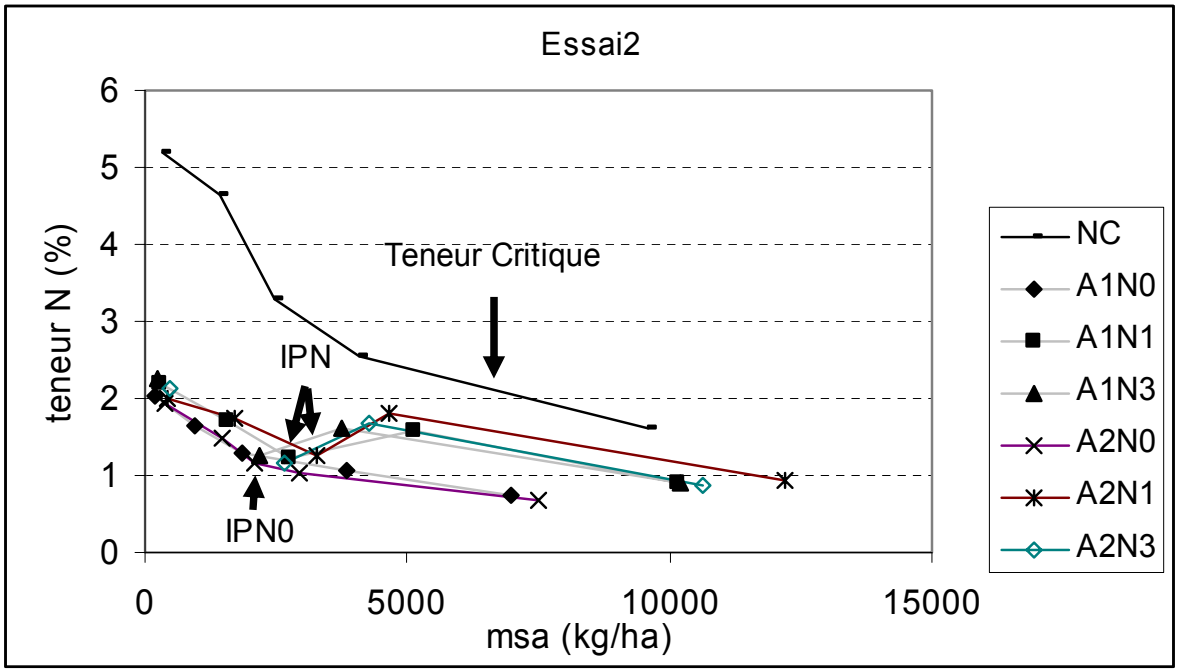


Figure A.84 : influence des traitements sur la dilution de l'azote

IPN = initiation paniculaire avec apport d'azote ; IPN0 = initiation paniculaire sur le témoin sans azote. La teneur critique est obtenue d'après l'équation : N = 5,18*msa^-0,52 (Sheehy et al, 1998).