

TABLE DES MATIERES

<i>Remerciements</i>	2
TABLE DES MATIERES.....	5
Abréviations utilisées.....	8
INTRODUCTION GENERALE.....	9
1 - <u>Chapitre 1 : CADRE DE L'ETUDE</u>	14
1.1 - Généralités communes à tous les sites : le Burkina Faso	15
- Climat.....	15
- Sols.....	18
- Végétation.....	20
- Evolution des productions céréalières (sorgho, mil, maïs).....	20
1.2 - La station : Saria	21
- Situation géographique.....	21
- Pluviométrie.....	21
- Morpho-pédologie.....	23
1.3 - Le milieu paysan : terroir de Thiougou	25
- Situation géographique.....	25
- Pluviométrie.....	25
- Morpho-pédologie.....	27
2 - <u>Chapitre 2 : MATERIEL ET METHODES</u>	29
2.1. – Généralités	30
2.2 - Méthodes analytiques et de mesure de la fixation de N₂	32
2.2.1 – Méthode de dosage de l'azote 15.....	33
2.2.2 – Méthodes d'analyses des caractéristiques physico-chimiques des sols.....	34
2.2.3 – Méthode de la valeur A.....	35
2.3 - Les différentes approches du bilan de l'azote	35
2.4 - Méthodes de mesure de la minéralisation, de la lixiviation, de la volatilisation et de la dénitrification	37
2.4.1 – Minéralisation de l'azote.....	37
2.4.2 – Lixiviation, volatilisation et dénitrification.....	38
2.5 - Les sites expérimentaux	38

3 - <u>Chapitre 3 : MINERALISATION DE L'AZOTE DANS LES SOLS SOUS CULTURES</u>	41
3.1 - Introduction	42
3.2 - Matériel et méthodes	42
3.2.1 - Les sites expérimentaux	42
3.2.2 - Principe de la méthode de mesure de N minéralisé <i>in situ</i>	44
3.3.3 - Dispositif de mesure de la minéralisation	45
3.3 - Résultats	45
3.3.1 - En station	45
3.3.2 - En milieu paysan	48
3.4 - Discussion	52
4 - <u>Chapitre 4 : FOURNITURE DE L'AZOTE A LA PLANTE</u>	57
4.1 - Introduction	58
4.2 - Disponibilité et utilisation de N provenant du sol et de l'engrais	58
4.2.1 - Matériel et méthodes	58
4.2.2 - Résultats	59
4.2.3 - Discussion	60
4.2.4 - Conclusion	62
4.3 - Disponibilité et utilisation de N provenant du sol et de la fixation de N ₂	62
4.3.1 - Matériel et méthodes	63
4.3.2 - Résultats et discussion	63
4.4 - Recherche d'indicateurs de N sol et N engrais absorbé par la plante	66
4.4.1 - Matériel et méthodes	66
4.4.2 - Résultats	68
4.4.3 - Discussion conclusion	75
5 - <u>Chapitre 5 : LES PERTES GLOBALES D'AZOTE HORS DU SYSTEME SOL-PLANTE</u>	78
5.1 - Introduction	79
5.2 - Matériel et méthodes	81
5.3 - Résultats	82
5.4 - Discussion	83

6 - Chapitre 6 : LES PERTES D'AZOTE PAR LIXIVIATION	87
6.1 – Introduction	88
6.2 - Matériel et méthodes	89
6.3 – Résultats	90
6.4 – Discussion	90
7 - Chapitre 7 : LES PERTES D'AZOTE PAR VOLATILISATION	92
7.1 – Introduction	93
7.2 - Matériel et méthodes	94
7.3 – Résultats	95
7.3.1 - Effets du niveau de fertilité du sol	95
7.3.2 - Effets de la toposéquence	96
7.3.3 - Effets de la localisation du champ : champ de brousse / champ de case	97
7.3.4 - Cinétiques de volatilisation de N engrais	97
7.3.5 - Relations entre les quantités de N urée volatilisé et les données des sols utilisés	100
7.4 – Discussion	101
8 - Chapitre 8 : LES PERTES D'AZOTE PAR DENITRIFICATION	103
8.1 – Introduction	104
8.2 - Matériel et méthodes	104
8.3 – Résultats	106
8.3.1 - Effets des pratiques culturales	106
8.3.2 - Effets de la toposéquence	109
8.3.3 - Effets de la localisation du champ : champ de brousse / champ de case	110
8.4 – Discussion	110
8.5 - Conclusion, perspectives	111
9 - DISCUSSION GENERALE	113
10 - PERSPECTIVES	122
BIBLIOGRAPHIE	126
ANNEXES	137

Abréviations utilisées

CAU : Accroissement de N_{tot} plante pour 100 kg d'azote engrais apporté, appelé coefficient apparent d'utilisation de N engrais.

Cb : Champ de brousse

Cc : Champ de case

Ci : champ intermédiaire

CRU : Pourcentage de NF absorbé par les parties aériennes de la plante, appelé coefficient réel d'utilisation de NF

MOS : Matière organique du sol

MS : Matière sèche de la partie aérienne de la plante

N : placé après un nombre désigne l'unité de N qui vaut 1 kg N ha⁻¹

N_{av} : Azote minéralisable à court terme (obtenu par la méthode Waring Bremner)

N_d : Azote disponible : pool N minéralisable (quantité d'azote minéralisable à la disposition d'une culture).

N_{dff} : N_{tot} plante dérivé de l'engrais

N_{dffix} : N_{tot} plante dérivé de la fixation de N₂

N_{dfs} : N_{tot} plante dérivé de la MOS, native et exogène.

N_{er} : Azote de l'érosion

N_{ex} : Azote exporté par les cultures

N_F : l'azote de l'engrais (N pour azote et F pour « fertilisant »)

N_{Fix} : Azote du sol provenant de la fixation symbiotique de N₂

N_{fix} : Azote provenant de la fixation libre et rhizosphérique de N₂

N_g : Azote volatilisé et dénitrifié (NH₃, N₂O et N₂)

N_{iS} : NF immobilisé dans le sol et les racines de l'ensemble du profil prospecté par les racines

N_{iS} : NF immobilisé dans le sol et les racines de l'horizon de surface (0-20 cm) à forte densité racinaire, donc de ce fait récupérable en partie par les cultures suivantes.

Nitrif nette : nitrification nette

N_I : Azote lixivié

N_p : Azote du sol provenant des pluies et poussières

N_r : Azote provenant des restitutions par la culture (racines + tiges + feuilles)

N_{tot} plante : Azote total des parties aériennes de la plante

N_{tot} sol : Azote total du sol

Vit nitrif : Vitesse de nitrification

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

AZOTE ET CHANGEMENT GLOBAL

L'azote fixé est essentiel à la vie. L'activité industrielle produit 60 % de cet azote principalement sous forme d'engrais et d'aliments notamment, ce qui signifie que 40 % provient de la fixation biologique de N_2 (FBN) ; la première activité est source de pollution, la seconde qui résulte de l'activité photosynthétique ne l'est pas, au contraire elle fixe de CO_2 . Lorsque cet azote est en excès par rapport aux besoins du système de production il devient polluant pour l'environnement ; cependant, en théorie, il devrait y avoir une *autorégulation du système biologique fixateur* en fonction de son niveau en N minéral ; malheureusement, il semblerait que ce ne soit pas toujours le cas (Vance, 2001)

L'économie de l'azote (azote provenant des engrais azotés et de la FBN) dans un système de production vise à optimiser la nutrition azotée des plantes (réduire les coûts), mais aussi à réduire les pertes (supprimer la pollution) sous forme de NO_3^- dans les eaux (objectif primordial en culture intensive depuis plus de 25 ans !) et plus récemment sous forme de N_2O et de NH_3 , dans l'atmosphère. Le processus régulateur de l'économie de l'azote est l'immobilisation biologique de N minéral dans le sol sous forme organique. C'est bien pourquoi, la préservation du *statut organique des terres* est un thème de recherche majeur.

La relation entre pertes de NO_3^- et acidification par pertes de Ca et Mg est tout aussi connue et bien montrée en milieu tropical. Sa minimisation repose sur une bonne gestion du *synchronisme offre-demande en N* des cultures.

Les effets néfastes de l'azote (acidification, pollution des nappes, émission des gaz à effet de serre (GES) et eutrophisation) sont interdépendants ; de plus, dans un objectif de dépollution, il ne faut pas se débarrasser d'un problème actuel, les teneurs élevées en NO_3^- des eaux et des effluents, en renvoyant le N_2O dans l'atmosphère et créant ainsi d'autres problèmes à long terme. La première cause de ces effets, c'est *l'excès de l'azote fixé (industriellement et biologiquement) par rapport aux besoins réels des systèmes* ; la seconde cause indiquée ci-dessus, qui engendre l'excès de N, est le défaut de synchronisme offre-demande. Ce sont ensuite les conditions écologiques et/ou géomorphologiques qui généreront un effet plus qu'un autre.

D'une façon générale, peu de données existent dans le domaine des bilans d'azote en régions tropicales.

1 - Rôle des nitrates dans l'acidification des sols et dans la pollution de nappes en régions tropicales

Le risque majeur d'acidification des sols dans l'hémisphère nord industrialisé provient du phénomène « Pluies acides », pluies qui vont acidifier les sols entraînant des carences et des toxicités préjudiciables principalement aux forêts. En zone tropicale, (i) l'acidification des sols est aussi importante mais elle est dû principalement à l'intensification des cultures et/ou à une gestion des sols inappropriée qui se traduit dans les deux cas par un départ des cations majeurs du sol respectivement par exportation directe par la culture et/ou par une lixiviation (l'anion nitrique étant le pilote), engendrant alors les mêmes contraintes que dans l'hémisphère nord mais *touchant cette fois-ci beaucoup plus les sols cultivés* ; (ii) la pollution des nappes, hormis dans les cultures industrielles pour lesquelles nous n'avons pas de données, ne semble pas dépasser la norme admissible; cependant, un risque fort existe en zones péri-urbaines où se développent le maraîchage et l'élevage, et dans les périmètres de culture intensive (canne à sucre, ananas...).

2 - Rôle de l'azote dans l'émission des gaz à effet de serre (GES)

Le protoxyde d'azote N_2O absorbe 200 fois plus le rayonnement infrarouge que le CO_2 et présente un RPG (Réchauffement Potentiel Global) à 10 ans 320 fois supérieur à celui du CO_2 ; il augmente de 0.25% par an. Les évaluations actuelles indiquent que *les sols, tempérés et tropicaux, cultivés ou non, sont responsables de près de 70% des émissions de N_2O* . Des mesures récentes (Germon, 1999) confirment que l'on peut observer des émissions aussi bien en sols peu humides, dues à la nitrification, qu'en sols plus fortement humides et attribuées à la dénitrification. Ces émissions sont faibles dans les sols où le niveau de N minéral est faible. La littérature s'appuyant principalement sur des observations de régions tempérées indique que *les émissions sont fortement dépendantes des apports d'engrais*. En zone tropicale ce même risque existe bien sur, accru en raison du facteur climatique en condition d'efficacité de l'engrais azoté faible, et en période de minéralisation active de la matière organique du sol (MOS), mais ce risque existe aussi en agriculture utilisant les légumineuses comme engrais vert ou comme plantes de couverture (voir ci-dessus) (Azontondé, 2000)

3 - Rôle des nitrates dans l'eutrophisation des eaux.

En zones tropicales caractérisées par une agriculture peu intensive, ce risque est bien moindre qu'en zones tempérées, cependant, un risque fort existe : (i) en zones urbaines et péri-urbaines où se développe le maraîchage, (ii) dans les périmètres de culture intensive (canne à sucre, ananas...) et, à plus forte raison, équipés d'un système de drainage des eaux comme c'est le cas par exemple de l'Autorité de Mise en valeur de la Vallée du Sourou (AMVS) au Burkina

Faso, (iii) en riziculture intensive, comme c'est le cas à Bagré et à la Kompienga au Burkina Faso.

AZOTE ET AGRICULTURE AU BURKINA FASO

Dans les sols de la zone soudano-sahélienne pauvres en matière organique, le risque environnemental est à priori très faible. En réalité ce risque existe et a deux causes : la première, naturelle, est liée au climat tropical : l'excès même temporaire d'azote minéral dans le sol, et la deuxième liée à l'intensification : l'apport d'engrais azoté au sol. En ce qui concerne la première cause, on sait depuis Dommergues et Mangenot (1970) se fondant sur les travaux de Birch (1958) que l'alternance climatique inter-annuelle ou intra annuelle (alternance humectation/dessiccation), encore appelée hygropériodisme, qui caractérise les sols tropicaux, peut être la source d'un accroissement même fugace des teneurs en azote minéral ; bien que limité dans le temps ces fortes teneurs peuvent être sources de pertes si le N-NO_3^- produit n'est pas utilisé. En ce qui concerne la deuxième cause, l'intensification, l'analyse du risque est la suivante : l'agriculture au Burkina Faso est essentiellement vivrière, pratiquée sur des terres pauvres en azote avec pour conséquences de faibles rendements. La consommation actuelle en engrais minéraux est d'environ 98 500 tonnes par an pour 41 110 000 ha. Pour améliorer la production, il est mis en place un plan d'action dont la phase en cours (2000-2010) prévoit la multiplication de la consommation en engrais minéraux par 2 (de 98 000 tonnes à 196 740 tonnes), soit une augmentation de 40 % des doses actuelles recommandées pour toutes les cultures. On sait par ailleurs que 96 % de ces engrais sont uniquement azotés et/ou sont des engrais composés fortement enrichis en azote. A de telles doses une fertilisation azotée inadaptée peut conduire à des pertes importantes. L'objectif principal de notre étude est la maîtrise de l'azote dans le système sol-plante : (i) la quantification de l'importance des pertes et tenter une approche de leurs déterminants. Partant des trois principales sources d'azote dans l'agrosystème : l'azote minéral du sol (que nous mesurons), l'azote engrais (que nous connaissons), et la fixation de N_2 (que nous mesurons), notre étude porte sur la mesure des flux 1, 2, et 3 du schéma ci-dessous, sur une année. Les sorties 4 (érosion, ruissellement) et 5 (immobilisation brute) ne sont pas mesurées, (ii) la recherche d'indicateurs facilement mesurables pertinents tels que NdfF (azote de la plante dérivé de l'engrais), et NdfS (azote de la plante dérivé du sol), (iii) la « manipulation » des flux majeurs en vue d'une réduction des pertes se traduisant par des recommandations en termes de pratiques culturales.

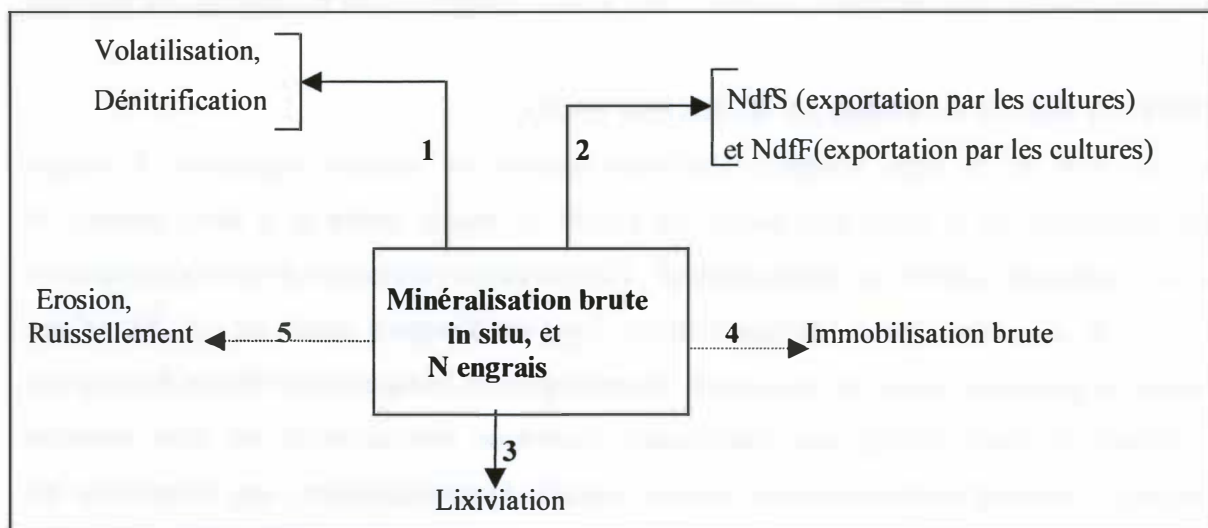


Figure 1: Schéma global du devenir de l'azote minéral *in situ*.

Ndff (azote de la plante dérivé de l'engrais), NdfS (azote de la plante dérivé du sol)

1 - Chapitre 1 : CADRE DE L'ETUDE	15
1.1 - Généralités communes à tous les sites : le Burkina Faso	15
- Climat	15
. Pluviométrie	15
. Vents et humidité de l'air	17
. Insolation	17
. Température et évapotranspiration	17
- Les Sols	18
- La végétation	20
- L'évolution des productions céréalières (sorgho, mil, maïs)	20
1.2 - La station : Saria	21
- Situation géographique	21
- La pluviométrie	21
- La morpho-pédologie	23
1.3 - Le milieu paysan : terroir de Thiougou	25
- Situation géographique	25
- La pluviométrie	25
- La morpho-pédologie	27

1 - Chapitre 1 : CADRE DE L'ETUDE

1.1 - Généralités communes à tous les sites : Le Burkina Faso.

- Climat

. Pluviométrie

Le régime des précipitations prévalant au Burkina Faso est de type unimodal caractérisé par des hauteurs d'eau décroissantes du Nord au Sud. Partant de ce gradient, Guinko (1984) a défini les deux principaux domaines climatiques du pays qui sont le sahélien au Nord et le soudanien au Sud. Guillobez (1985), dans une étude plus détaillée, couple les paramètres climatiques et phytogéographiques, et découpe ces deux entités en cinq zones respectivement du Nord au Sud (carte 1-A) :

- zone sahélienne (pluviométrie annuelle moyenne de 500 à 600 mm)
- zone sub-sahélienne (600 à 700 mm)
- zone nord-soudanienne (700 à 950 mm)
- zone centre-soudanienne (950 à 1100 mm)
- zone sud-soudanienne (1100 à 1400 mm).

Plus récemment, on constate un glissement des isohyètes vers le sud à partir des deux dernières décennies. L'isohyète 1200 mm a complètement disparu du pays, l'extrême sud-ouest ne bénéficie plus que de 1100 mm et l'extrême nord de 400 mm (Somé et Sivakumar, 1994).

Les pluies, de part leur variabilité spatio-temporelle ainsi que leur agressivité, influencent la production agricole indirectement (risque d'érosion) et directement (stress hydrique). L'intensité des pluies est principalement responsable des pertes par érosion hydrique des sols suite à leur désagrégation surtout pendant les mois de mai et de juin qui marquent le début de la saison des pluies où les sols agricoles sont généralement nus. En effet Lahaye (1980) et Mietton (1988) indiquent une intensité exceptionnelle des pluies journalières dépassant 120 mm/heure, et c'est pourquoi Guillobez (1992) adapte l'équation d'agressivité de la pluie établie par Wischmeier et Smith (1987) à la situation du Burkina Faso en ces termes :

$$R = 3.56 P(\text{max}) + 0.67 P + 26.89 \text{ Lat} - 569.51$$

Avec : R = indice d'agressivité (en unités USA), P(max) = la pluie journalière la plus forte de l'année ; P = la pluviosité annuelle ; Lat = latitude du lieu considéré.

On assiste souvent à des fins de saisons des pluies assez brutales (fin septembre), périodes où les céréales sont encore immatures. C'est la raison pour laquelle la maîtrise de l'eau par des pratiques culturales adaptées reste une des clés de la gestion de la fertilité des sols.

CARTE 1 : PRESENTATION DES SITES D'ETUDE



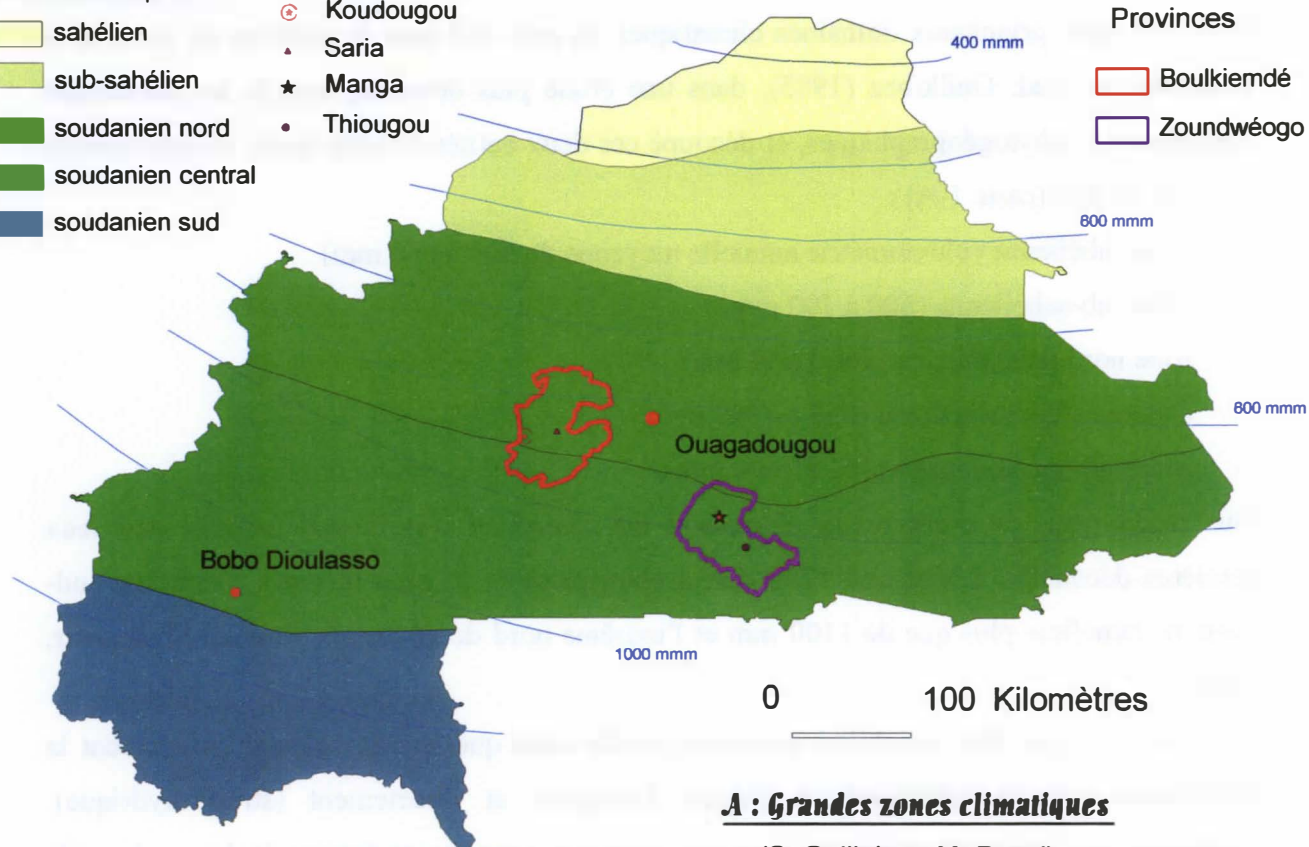
Zones climatiques

- sahélien
- sub-sahélien
- soudanien nord
- soudanien central
- soudanien sud

- ⊙ Koudougou
- ▲ Saria
- ★ Manga
- Thiougou

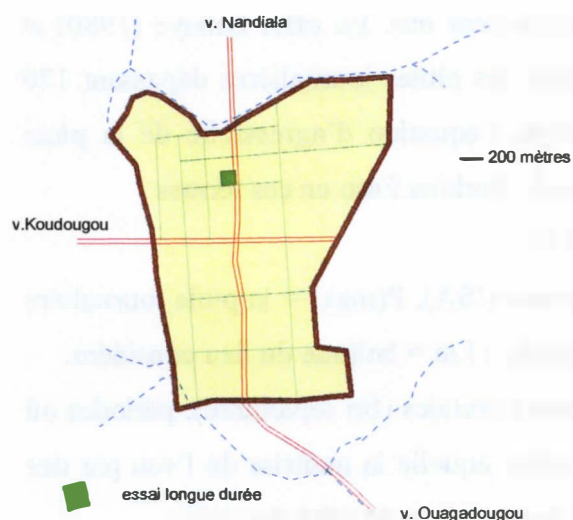
Provinces

- Boulkiemdé
- Zoundwéogo

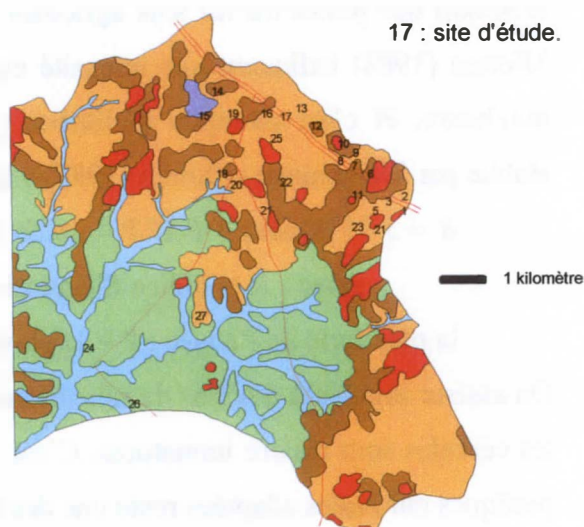


A : Grandes zones climatiques

(S. Guillobez; M. Bonzi)



B : Station de recherche de Saria



C : Terroir de Thiougou

. Vents et humidité de l'air

Le Burkina Faso est sous la dominance de deux vents :

(1) l'harmattan : ce vent desséchant est chaud pendant la journée et frais la nuit. Il souffle d'est en ouest, des hautes pressions sahariennes vers les côtes océaniques ;

(2) la mousson : ce vent chargé d'humidité souffle des côtes océaniques (Golfe de Guinée) vers l'intérieur du continent africain. Au Burkina Faso, il souffle du sud-ouest au nord-est.

Ces deux vents déterminent respectivement un régime d'air sec continental et un régime d'air humide. Le passage d'un flux à l'autre se produit 2 fois par an. La zone de séparation entre deux flux appelée front de mousson oscille alors au cours de l'année du Golfe de Guinée au 25^{ème} parallèle. Pour le Burkina Faso, l'humidité de l'air diminue du sud au nord suivant ainsi la décroissance de la pluviométrie. D'octobre à mai, l'humidité relative est généralement très faible (10-20 %) en milieu de journée. De juin à septembre elle est très élevée et même saturante au lever du jour (supérieure à 90 %).

. Insolation

La moyenne annuelle de la durée de l'insolation enregistrée au Burkina Faso varie de 8 heures par jour dans le sud-ouest à plus de 9 heures dans le nord. Elle diminue progressivement du nord au sud-ouest. On enregistre un rayonnement global moyen de plus de 2000 joules/cm²/jour. A l'intérieur de l'année, le mois d'août reste le moins ensoleillé mais, de part l'importance du rayonnement solaire, l'énergie disponible dans le sol reste suffisante pour les cultures.

. Température et évapotranspiration

Selon la variation des températures, on peut repartir l'année en plusieurs périodes :

1- décembre - février : période relativement fraîche avec des températures allant de 15 à 20 °C la nuit et de 28 à 30 °C dans la journée. Cette période correspond à l'époque pendant laquelle souffle l'harmattan. L'hygrométrie atteint des valeurs très faibles ;

2- mars - mai : période très chaude avec des températures variantes entre 28 et 40°C en moyenne. C'est la pleine saison sèche ;

3- Juin - septembre : faibles températures mais variables à cause des pluies avec des hausses un peu avant les orages. Cette période correspond à l'action prépondérante des influences marines. L'hygrométrie est élevée, les températures nocturnes ne descendent pas en dessous de 20°C et les températures diurnes dépassent rarement 30°C ; c'est l'hivernage ;

4- octobre - novembre : début de la saison sèche avec des températures relativement hautes allant de 21 à 35 °C.

La demande évaporative estimée par la valeur mesurée ou calculée de l'évapotranspiration potentielle subit de fortes variations saisonnières. Maximale en période chaude de la saison sèche, elle décroît ensuite rapidement avec l'installation de la saison des pluies. A titre

d'exemple, l'ETP (Turc) à la station de Saria au centre du Burkina Faso (site des essais en station) est de l'ordre de 2000 mm an^{-1} (Roose, 1979). Elle atteint 3 à 4 mm j^{-1} en août et peut dépasser 7 mm j^{-1} en saison sèche. L'évaporation (bac classe A) varie de 2 mm j^{-1} en août à 12 mm j^{-1} en janvier à Bobo-Dioulasso à l'ouest du Pays (Somé et al., 1992).

- Les sols

La nature des sols du Burkina Faso dépend essentiellement du type d'altération des principales roches. Ainsi pour les roches acides (grès, granites), ce processus donne des sols ferrugineux (kaolinite) tandis que pour les roches basiques ce processus d'altération donne les sols vertiques (montmorillonites).

Selon la carte des processus pédogénétiques, (Somé et al., 1992), on peut distinguer trois groupes de sols (carte 2 couvrant les sites d'étude) :

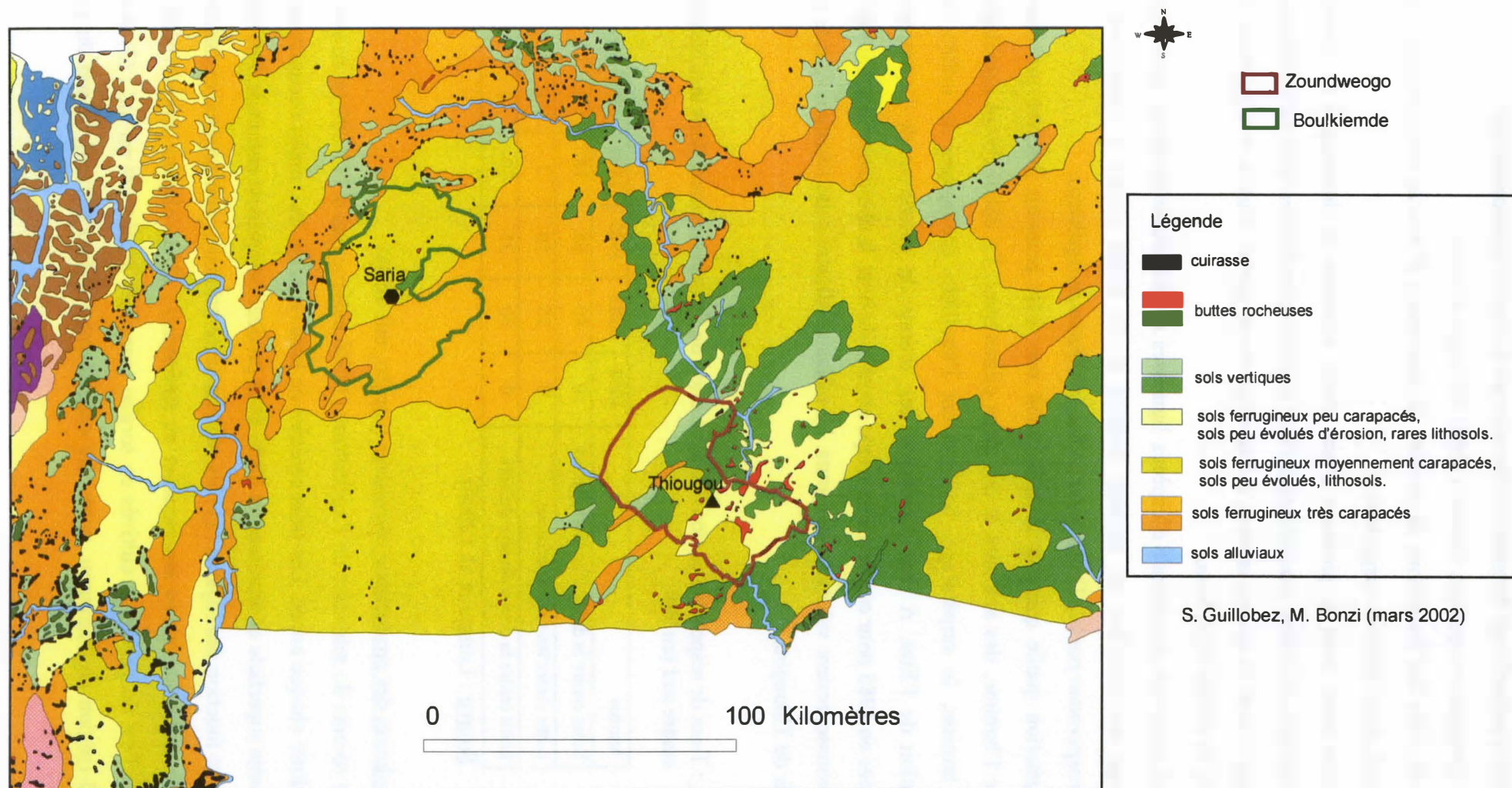
a) les sols ferrugineux, plus ou moins lessivés et indurés, et les sols faiblement ferrallitiques. Les sols ferrugineux plus ou moins indurés occupent la plus grande partie du territoire burkinabè dont le plateau central (notre zone d'étude) et le sud, tandis que les sols ferrallitiques se situent dans le sud-ouest ;

b) les vertisols (dans les vallées), les sols bruns eutrophes, les sols alcalins ou sodiques (en zone sahélienne) ;

c) le groupe des sols non climatiques avec les lithosols (sur cuirasses ou roches), les sols peu évolués d'apport ou d'érosion, les sols hydromorphes des bas-fonds ou des plaines alluviales. Les sols les plus répandus dans nos sites d'étude sont « les ferrugineux tropicaux » pauvres en matière organique ($\text{MOS} < 1 \%$), et à dominance de kaolinite (argile 1/1).

Dans l'ensemble, ces sols présentent naturellement une fertilité limitée (propriétés physiques défavorables, faibles réserves minérales, carence assez prononcée en phosphore). Ils représentent souvent une structure compacte et manquent de profondeur. Ils ont une forte sensibilité à l'érosion, donc à la dégradation. Cependant, des pratiques et une fertilisation adaptée accroissent leurs potentialités agricoles.

Carte 2 : Carte simplifiée des sols du sud du plateau central : Burkina Faso



- La végétation

La végétation naturelle est fortement influencée par le régime pluviométrique.

Selon les formations végétales, Guinko (1984) distingue 4 zones :

- (1) le nord, avec les formations steppiques (à dominance d'*Acacia senegalensis*, d'*Acacia radiana*, et de *Balanites aegyptiaca*),
- (2) le centre-nord, avec la présence d'une strate arbustive (à dominance de *Combretum micranthum*, et *Guiera senegalensis*), et de formations herbeuses nettement majoritaires,
- (3) le centre, avec la savane arborée à *Butyrospermum parkii*, *Guiera senegalensis*, *Acacia albida*, et *Parkia biglobosa*,
- (4) le sud, avec une dominance d'espèces ligneuses et, une strate herbacée plus dense. Le paysage est constitué de savanes boisées et de forêts claires à *Isoberlinia doka*, *Butyrospermum parkii*, *Tamarindus indica*, et *Khaya senegalensis*.

Cette végétation quelle que soit la zone, subit une forte pression foncière provenant des actions de l'homme, des animaux et des aléas climatiques. Le déboisement anarchique, les feux de brousse, le surpâturage, bouleversent l'équilibre écologique du milieu, malgré l'intervention de l'Etat. A titre d'exemple, les actions de protection de l'environnement développées en 1985 pour combattre la coupe abusive du bois, la divagation des animaux et les feux de brousse, restent vaines de nos jours. Le tableau 1 illustre cette situation dans le centre-sud, terroir de Thiougou.

Tableau 1 : Taux de respect des actions de protection de l'environnement dans la région du centre sud (en %)

Années	1980	1983	1985	1990	1999
Lutte contre la divagation des animaux.	0	40	65	10	0
Lutte contre les feux de brousse.	0	15	10	2	1
Lutte contre la coupe abusive du bois.	0	30	25	70	0

Source : Lompo et al. (2000).

- L'évolution des productions céréalières (sorgho, mil, maïs)

Une étude récente du ministère de l'agriculture (1999) indique que 4 111 000 ha de terre sont mis en culture chaque année. Les trois céréales de base (sorgho, mil, maïs) occupent environ 80 % de cette superficie et représentent 80 % de la production agricole nationale. Les types de céréales sont fonction des régions : (1) les régions septentrionales sont presque exclusivement cultivées en mil (*Pennisetum americanum* ou *typhoides*) ; (2) le plateau central (notre zone d'étude) et l'est du pays sont cultivés en sorgho (*sorghum bicolor*) et en mil ; (3) la partie centre-sud (région de Thiougou, notre site expérimental milieu paysan), le sud du plateau

central et, d'une façon générale les champs de case qui bénéficient d'une fertilisation soutenue, sont cultivés en maïs ; (4) la région sud-ouest, la mieux arrosée est le domaine le plus cultivé en maïs (Wey, 1995) et depuis ces dernières années en sorgho avec plus de 50 % de la production céréalière totale régionale. On y rencontre aussi un peu de mil.

Les contraintes majeures à la production agricole en milieu paysan sont, en plus des aléas climatiques, l'inadéquation des pratiques culturales, la faible fertilisation, ces deux dernières étant liées au faible revenu des producteurs.

1.2 - La station de Saria

- Situation géographique

La station de recherches environnementales et agricoles de Saria (carte 1B), est située au Centre-ouest du Burkina Faso (cartel A), à 80 km au Nord-ouest de Ouagadougou, la capitale, et à 25 km à l'est de Koudougou son chef lieu de province. Ses coordonnées géographiques sont :

- Latitude : 12°16'N
- Longitude : 2°9'W
- Altitude : 300 m

Elle présente un relief relativement plat avec une légère pente de 7 pour mille.

- La pluviométrie

A l'image de celle du pays, la pluviométrie de Saria enregistre des variabilités inter et intra annuelles comme l'indique les figures 2, et 3. Les variabilités intra-annuelles sont une contrainte majeure du rendement des cultures. La figure 4 qui est une comparaison de la pluviométrie décadaire des années d'étude (1999 et 2000) et de celle des 20 dernières années (1979-1998) montre une période de déficit hydrique se situant dans la 23^{ième} décade (2^{ième} décade du mois d'août), qui correspond à la formation des grains pour la plupart des cultures.

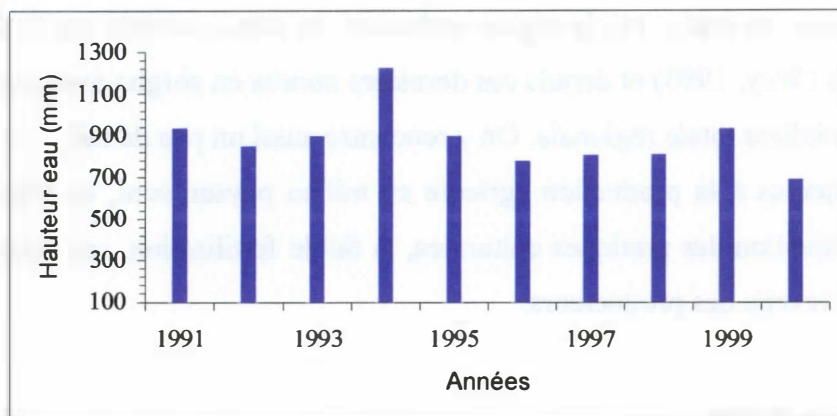


Figure 2 : Variabilité inter-annuelle de la pluviométrie à Saria de 1991 à 2000.

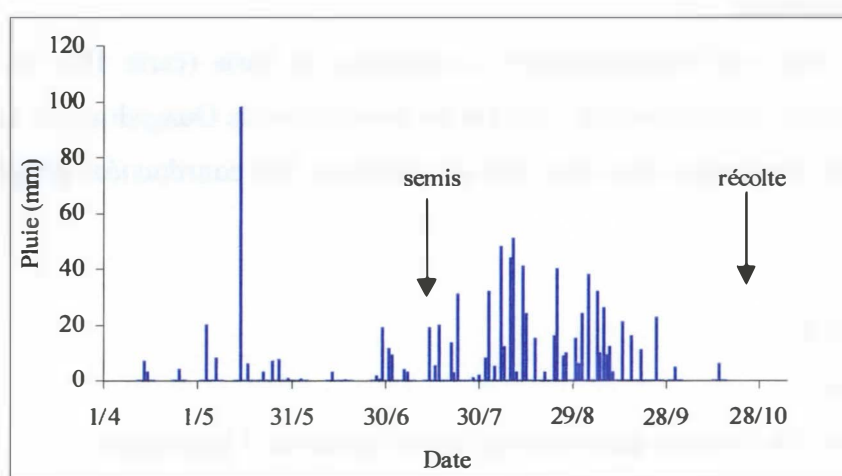


Figure 3 : Variabilité intra-annuelle de la pluviométrie à Saria en 1999.

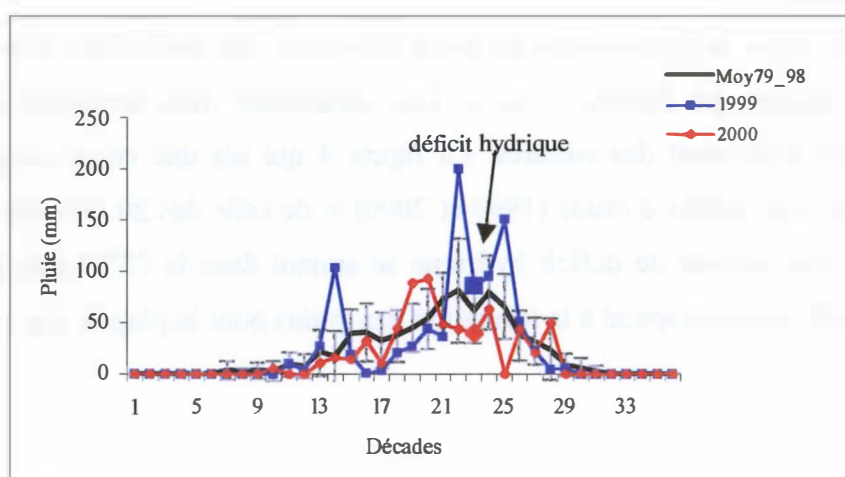


Figure 4 : Variabilité de la pluviométrie décadaire 1999 et 2000 par rapport aux moyennes décadaires des 20 dernières années (1979-1998) assorti de l'écartype. Station de Saria.

- La morpho-pédologie

Selon les travaux morpho-pédologiques de reconnaissance de Saria réalisés par Bertrand (1989) on distingue quatre interfluves comprenant chacune cinq unités paysagiques qui sont : le sommet d'interfluve (SI), le haut de versant (HV), le bas de versant (BV) et le remblai alluvial (R). La station de recherches environnementales et agricoles de Saria se partage principalement entre deux de ces unités (carte 3):

- HV : le haut de versant occupant la majeure partie de la moitié Est de la station, comprend des sols rajeunis dérivés d'une altération monofersialitique (latérite subaffleurante). Il est caractérisé par des sols gravillonnaires avec plus de 80 % de gravillons ferrugineux et quartzeux. Le HV et le BV sont séparés par une nette rupture de pente ;
- BV : cette unité occupe le reste de la station avec des sols de même origine que ceux de l'unité HV mais présentant des tendances à l'hydromorphie provoquées par l'induration des altérites (argiles bariolées) à des profondeurs variables (50 à 100 cm). En surface, on note cependant un appauvrissement de ces terres par le lessivage des particules plus fines. Ces sols devenus sableux en surface passent, dès 20 à 30 cm de profondeur, à des argiles sableuses très claires et fortement tachetées appelées pseudogley.

Dans le bas-fond situé le long du marigot limitant la partie Ouest de la station de recherche, on rencontre une petite partie de l'unité R, constituée de matériaux limono-sableux à limono-argilo-sableux avec la présence de la nappe phréatique à 2 ou 3 mètres.

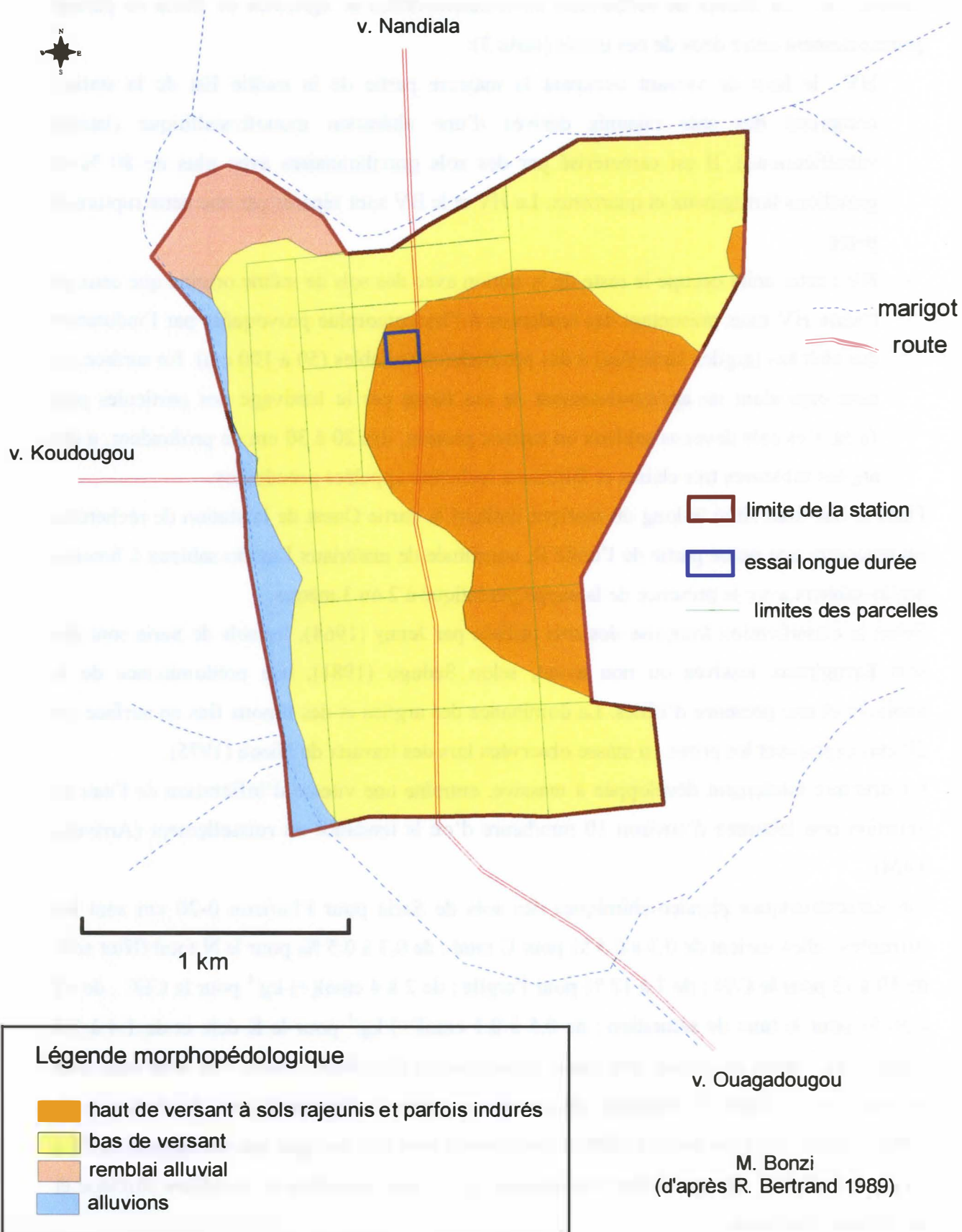
Selon la classification française des sols utilisée par Jenny (1964), les sols de Saria sont des sols ferrugineux lessivés ou non ayant, selon Sedogo (1981), une prédominance de la kaolinite et une présence d'illites. La dominance des argiles et des limons fins en surface (0-20 cm) expliquent les prises en masse observées lors des travaux de Nicou (1975).

La structure faiblement développée à massive, entraîne une vitesse d'infiltration de l'eau en situation non labourée d'environ 10 mm/heure d'où la tendance au ruissellement (Arrivets, 1974).

Les caractéristiques physico-chimiques des sols de Saria pour l'horizon 0-20 cm sont les suivantes : elles varient de 0.3 à 0.5 % pour C total ; de 0.3 à 0.5 ‰ pour le N total (N_{tot} sol), de 10 à 13 pour le C/N ; de 7 à 12 % pour l'argile ; de 2 à 4 cmol(+) kg⁻¹ pour la CEC ; de 45 à 50 % pour le taux de saturation ; de 0.5 à 0.1 cmol(+) kg⁻¹ pour le K éch. et de 1.4 à 1.6 cmol(+) kg⁻¹ pour la somme des bases échangeables (Kambiré, 1994). Ces sols sont tous carencés en P comme le montrent de nombreux travaux notamment ceux de Pichot et al. (1981), Guira (1988) et Bonzi (1989). Cette carence peut être corrigée par des apports de 25 à 50 kg de P₂O₅ ha⁻¹. Ils s'acidifient rapidement (pH 5) sous les effets de la culture continue et des engrais minéraux.



Carte 3 : Station de Saria carte morphopédologique



1.3 - Le milieu paysan : terroir de Thiougou

- Situation géographique

Le tableau ci-dessous indique les coordonnées géographiques de Thiougou :

Intitulé	Village de Thiougou
Distance / chef lieu de province	30 km de Manga
Distance / capitale du pays	130 km de Ouagadougou
Latitude nord	11° 27
Longitude ouest	1° 51
Altitude moyenne	300 m

- La pluviométrie

La pluviométrie de Thiougou, bien que quantitativement supérieure à celle de Saria, enregistre également des variabilités inter et intra-annuelles (fig. 5 et 6). En effet au cours des 10 dernières années, on a enregistré un maximum en 1994 avec une pluviométrie annuelle de 1400 mm et un minimum de moins de 800 mm en 1996. La variabilité intra-annuelle de la pluviométrie engendre le risque de stress hydrique ; la figure 7 montre : (i) un déficit hydrique pendant tout le mois de juin (16^{ième} à la 18^{ième} décade) pour l'année 1999 ce qui a conduit à la mauvaise levée des cultures ; (ii) une fin hâtive de la pluviométrie en l'an 2000 (2^{ième} décade de septembre) qui n'a pas permis à de nombreuses cultures de boucler leur cycle. Ces déficits hydriques intra-saison des pluies fréquents en Afrique de l'Ouest ont été déjà signalés au Sénégal par Dancette (1979) et au Burkina Faso par Somé (1989). La variabilité inter-annuelle de la pluviométrie (fig. 5) affecte aussi la culture ; par exemple, en année pluvieuse, la pression des adventices et des phytophages est accentuée, et, en année peu pluvieuse, les cycles cultureux de certaines plantes n'arrivent pas à terme.

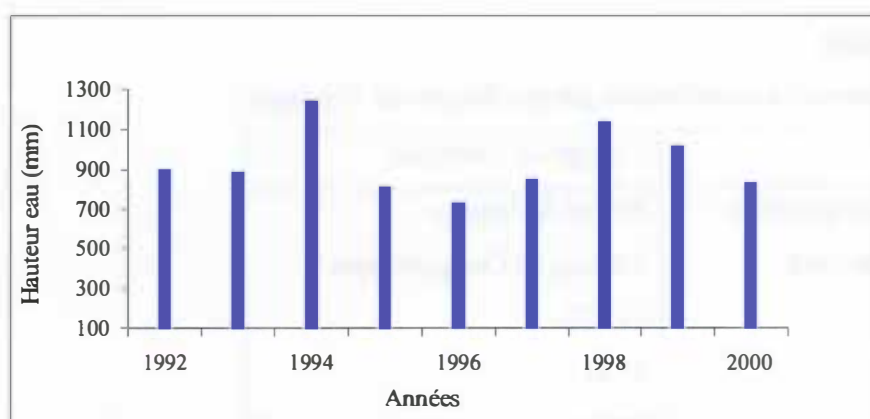


Figure 5 : Variabilité inter-annuelle de la pluviométrie à Thiougou de 1992 à 2000.

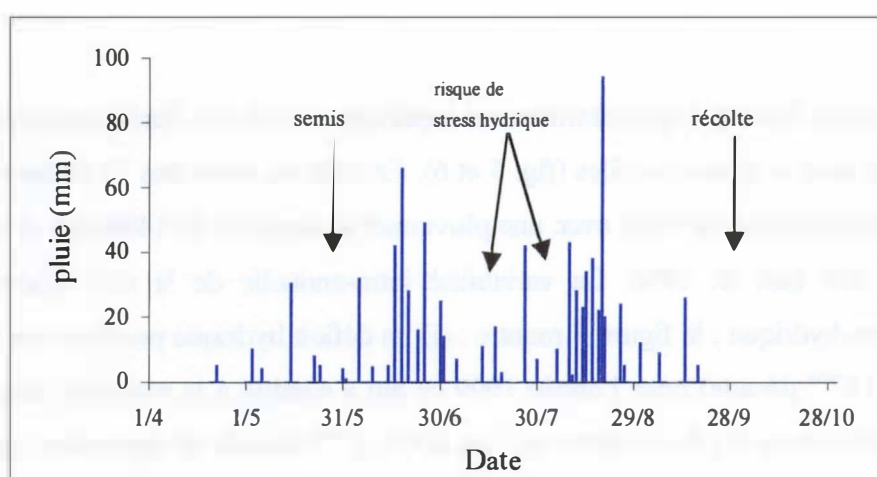


Figure 6 : Variabilité intra-annuelle de la pluviométrie à Thiougou en l'an 2000.

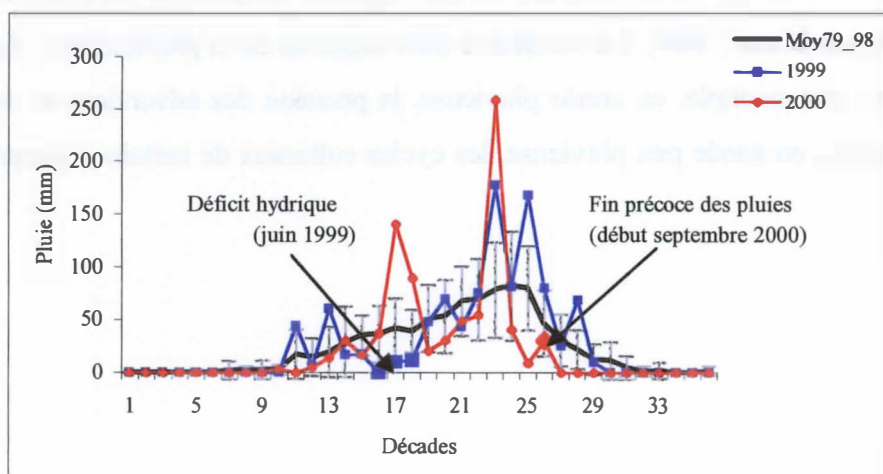


Figure 7 : Variabilité de la pluviométrie décadaire 1999 et 2000 par rapport aux moyennes décadales des 20 dernières années (1979-1998) assorti de l'écartype. Localité de Thiougou.

- La morpho-pédologie

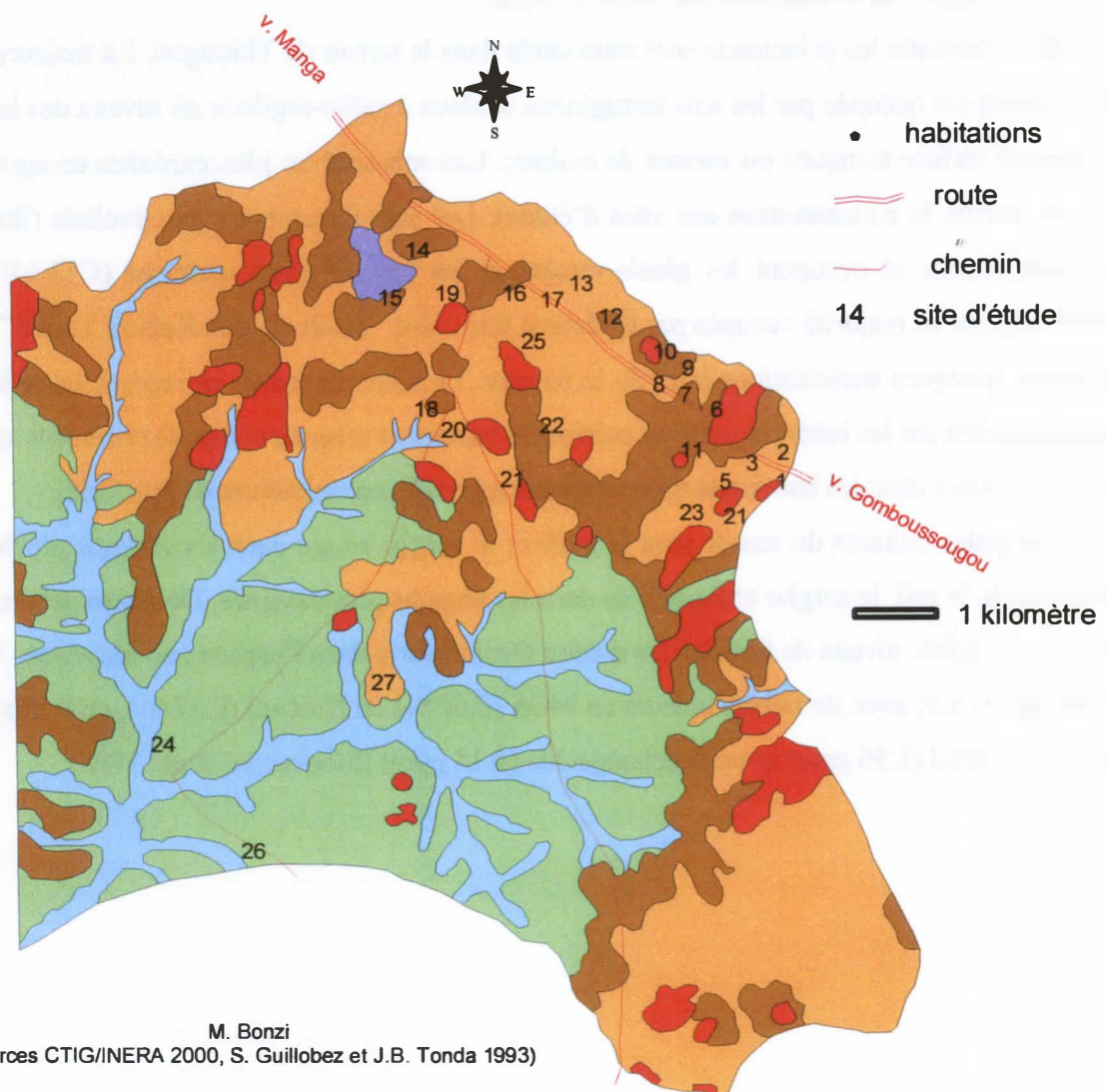
Le terroir de Thiougou se partage entre deux unités pédogénétiques et géologiques majeures :

- . les sols ferrugineux sur roche acide du socle,
- . les sol vertiques ou ferrugineux sur roche basique.

La carte 4 présente les principaux sols rencontrés dans le terroir de Thiougou. La majeure partie de ce terroir est occupée par les sols ferrugineux sableux à sablo-argileux au niveau des hauteurs (collines à surface tronquée ou versant de colline). Ces sols sont les plus exploités en agriculture (ce qui justifie la concentration des sites d'étude). Les sols ferrugineux peu évolués (lithosols) viennent ensuite et occupent les glacis-versant et les bas de glacis cuirassé (CTIG/INERA, 2000). Ils sont en majorité occupés par la réserve forestière 'Forêt classée Kaboré Tambi'. On y rencontre quelques exploitations hors de la réserve. Le reste du terroir se répartit entre les sols embryonnaires sur les buttes et collines cuirassées (rarement mise en cultures) et les sols argileux à argilo-sableux dans les bas-fonds (généralement exploités en riziculture de bas fond).

Les principales cultures du terroir sont le maïs et le sorgho rouge dans les champs proches des concessions, le mil, le sorgho et l'arachide dans les champs plus éloignés. De façon générale, ces sols sont de faible niveau de fertilité, mais cette fertilité varie dans l'espace ; en moyenne, ils sont acides ($\text{pH} = 5.5$) avec de faibles teneurs en MOS (0.68 %) en N_{tot} sol (0.37 %), en P total (0.51 ppm), en K total (1.56 ppm) et en K échangeable (0.14 ppm) (Stoorvogel et al., 1998)

Carte 4 : Carte des sols du terroir de Thiougou, localisation des sites d'études en milieu paysan



Légende

- butte et colline cuirassée, sol embryonnaire, lithosol.
- colline à surface tronquée, sols ferrugineux, sableux à sablo-argileux.
- colline à surface tronquée, sols vertiques.
- versant et colline, sols ferrugineux, sableux à sablo-argileux.
- glacis-versant et bas glacis cuirassé, sols ferrugineux, sols peu évolués, lithosols.
- bas-fond, sols argileux à argilo-sableux.

2 - Chapitre 2 : MATERIEL ET METHODES	30
2.1. – Généralités	30
2.2 - Méthodes analytiques et de mesure de la fixation de N₂	32
2.2.1 – Méthode de dosage de l'azote 15	33
2.2.2 – Méthodes d'analyses des caractéristiques physico-chimiques des sols	34
2.2.3 – Méthode de la valeur A	35
2.3 - Les différentes approches du bilan de l'azote	35
2.4 - Méthodes de mesure de la minéralisation, de la lixiviation, de la volatilisation et de la dénitrification	37
2.4.1 – Minéralisation de l'azote	37
2.4.2 – Lixiviation, volatilisation et dénitrification	38
2.5 - Les sites expérimentaux	38

Sigles utilisés

A.I.E.A : Agence International de l'Energie Atomique

C.E.N. : Centre d'Etudes Nucléaires

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le
développement

C.N.R.S : Centre National de la Recherche Scientifique

IN.E.R.A : INstitut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (Burkina Faso)

I.N.R.A : Institut National de Recherches Agronomiques (France)

2 - Chapitre 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1 - Généralités

L'emploi de l'azote ^{15}N , isotope stable, accroît les possibilités d'investigation (de mesures et de suivi) offertes par les techniques classiques de mesure des flux du cycle de l'azote. Guiraud (1984) montre que la sensibilité de la méthode isotopique est au moins 50 fois supérieure à celle espérée sur les dosages kjeldahl à partir de cet exemple : « si on suppose un apport de 100 kg d'azote à l'hectare sur un sol qui en contient 3000 kg (on estime en effet 3000 t sol ha^{-1} à 1 ‰ de N total), le dosage Kjeldahl ne peut pas rendre compte de l'effet de cet apport ; par contre, si cet azote est marqué à 10 % de ^{15}N , il sera dilué environ trente fois et donnera donc un excès moyen voisin de 0.3 % mesurable avec précision » ; si l'incorporation n'est que de 10 kg, l'excès sera encore de 0.03 %, valeur parfaitement accessible avec les spectromètres de masse conçus pour les mesures d'abondances isotopiques naturelles ayant une double introduction et une double collection (Mariotti et Letolle, 1978).

Les techniques et méthodologies utilisées sont celles développées à l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique (AIEA) à Vienne par Fried et Broashart (1975) et au CEN (Centre d'études nucléaires) de Cadarache en France par Guiraud (1984). L'utilisation de ^{15}N comme traceur repose sur trois hypothèses fondamentales selon Hauck et Bremner (1976) et Guiraud (1984) qui sont :

- 1- les éléments ont à l'état naturel une composition chimique constante ;
- 2- les organismes vivants ne peuvent distinguer un isotope d'un autre ;
- 3- les propriétés chimiques des isotopes sont conservées dans les systèmes biologiques.

Depuis une trentaine d'années les techniques isotopiques permettent d'étudier le bilan de l'engrais azoté et le bilan de l'azote plus généralement dans un système sol-plante de la zone tropicale selon une approche décrite par Wetselaar et Ganry (1982). Pour notre travail, nous avons adopté cette approche et utilisé les termes définis par Guiraud (1984) et par l'AIEA (1990) :

L'abondance isotopique ou encore teneur isotopique en % (A %) : c'est le rapport en % du nombre d'atomes de l'isotope ^{15}N par rapport au nombre d'atomes de l'ensemble des isotopes du milieu ($^{15}\text{N} + ^{14}\text{N}$).

A est calculé à partir de l'équation suivante :

$$A \text{ (en \%)} = \frac{\text{Nombre d'atomes } ^{15}\text{N}}{\text{Nombre d'atomes } ^{14}\text{N} + ^{15}\text{N}} \times 100$$

De façon usuelle on adopte pour A de l'air qui sert toujours de référence : $A = 0.3663 \%$;

L'excès isotopique (E %) d'un échantillon est la différence entre A % de l'échantillon et A % de l'air pris toujours comme référence. Elle s'exprime ainsi :

$$E (\%) = A \text{ \% (échantillon)} - 0.3663 \%$$

Le Ndff (en % et en équivalent de l'engrais utilisé) (Nitrogen derived from Fertilizer) désigne l'azote des parties aériennes de la plante (Ntot plante) provenant de l'engrais apporté. En terme mathématique, il s'agit du rapport entre la quantité d'azote de l'engrais prélevée par la plante sur la quantité totale d'azote trouvée dans cette plante :

$$\% \text{ Ndff} = \frac{E \text{ plante}}{E \text{ engrais}} \times 100 \quad (E = \text{excès isotopique}) ;$$

$$\text{Ndff (en équivalent engrais)} = \text{Ntot plante} \times \text{Ndff \%}$$

Le NdfS (Nitrogen derived from Soil) désigne l'azote des parties aériennes de la plante provenant de la matière organique du sol, native et exogène (donc de la source d'azote non apportée). En terme mathématique il s'agit, dans un système sans fixation d'azote atmosphérique, de :

$$\text{NdfS \%} = 100 - \text{Ndff \%}$$

$$\text{NdfS (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{Ntot plante (kg ha}^{-1}\text{)} - \text{Ndff (kg ha}^{-1}\text{)}$$

Mais dans le cas d'une légumineuse ou de tout autre plante fixatrice d'azote, il faudra alors soustraire la quantité d'azote provenant de l'activité fixatrice (NdfFix) ; cette valeur « $100 - \% \text{ Ndff}$ » étant en réalité égale à « $\% \text{ NdfS} + \% \text{ NdfFix}$ »

Le NdfFix est l'azote de la plante provenant de la fixation biologique de N_2 évaluée soit en pourcentage de Ntot plante (N total des parties aériennes de la plante) (NdfFix %), soit en kg N ha^{-1} dans Ntot plante. Nous utiliserons la terminologie NdfFix dans notre étude, pour désigner la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par le niébé calculé à partir de la méthode de la Valeur A. NdfFix désigne le N provenant de la fixation libre et rhizosphérique de N_2 (non mesuré mais estimé dans notre étude dans le cas du sorgho).

Le Coefficient Réel d'Utilisation de l'azote engrais (CRU %)

Ce coefficient représente le pourcentage de l'azote engrais absorbé dans les parties aériennes de la plante. Il est calculé à partir de l'équation suivante :

$$\text{CRU \%} = \frac{\text{Ntot plante avec engrais.}}{\text{NF (N engrais)}} \times \text{Ndff \%}$$

Le Coefficient Apparent d'Utilisation de N-engrais (CAU %)

Dans un système sol-plante-engrais avec de l'engrais azoté, le CAU % est le rapport entre la quantité totale d'azote trouvée dans les parties aériennes de la plante fertilisée pouvant provenir de l'engrais sur la quantité total d'azote apporté par cet engrais. C'est en fait une estimation de l'effet de l'engrais azoté sur l'accroissement de Ntot plante.

$$\text{CAU (en \%)} = \frac{\text{Ntot. plante avec engrais.} - \text{Ntot. plante sans engrais}}{\text{NF}} \times 100$$

L'azote immobilisé (NiS) est la part de l'azote engrais immobilisée dans le sol et les racines de l'ensemble du profil prospecté par les racines. Il est directement mesuré à partir d'analyses ¹⁵N des échantillons de sol prélevés dans chaque horizon.

La Valeur A. Elle représente la quantité d'azote disponible dans une source (air, sol ou engrais) exprimée en équivalent engrais, de l'engrais apporté pour la mesurer. Cette méthode est définie plus loin.

Rappelons que Ndff, NdfS, NdfFix et Valeur A sont des abréviations définis par l'AIEA (1990).

2.2 - Méthodes analytiques et de mesure de la fixation de N₂

Laboratoires et types d'analyses

Les différents dosages et essais en milieu contrôlé ont été réalisés dans différents laboratoires. Le tableau ci-dessous indique d'une part le Laboratoire, et d'autre part le type d'analyse et l'essai concerné en regard de leur nom :

Laboratoire	Type d'analyse
Laboratoire Matières Organiques des Sols Tropicaux (MOST) du CIRAD Montpellier, France	. N minéralisable (méthode Waring-Bremner) des sols des essais en station et en milieu paysan . N total de l'engrais ^{15}N apporté au sorgho, au mil et au niébé en station et au maïs en milieu paysan ; . N-NH_4 et N-NO_3 Ca, Mg et K des solutions de tensionics de l'essai « Perte en N par lixiviation »; . Préparation des extraits pour le dosage ^{15}N par le laboratoire Solaize du CNRS (Lyon)
Laboratoire d'analyses du CIRAD Montpellier, France	. Caractérisation physico-chimiques des sols de tous les essais (en station et en milieu paysan)
Laboratoire du CNRS à Solaize (Lyon), France	. Analyses isotopiques ^{15}N et N total des échantillons de végétaux de tous les essais en station et en milieu paysan . Analyses isotopiques ^{15}N des échantillons de solution d'urée de « départ » utilisé dans chaque essai en station et en milieu paysan . Analyses isotopiques ^{15}N des échantillons de sols des essais en station
Laboratoire d'analyse des sols, eaux, végétaux de l'INERA, Saria (Burkina Faso)	. Dosage de N volatilisé de l'essai Volatilisation de N-urée au Laboratoire
Laboratoire de microbiologie des sols INRA/Dijon, France	. Mesures de N_2O et de CO_2 et du potentiel de dénitrification au laboratoire

2.2.1 - Méthodes de dosage de l'azote ^{15}N .

Le dosage de l'azote ^{15}N se fait sur l'azote gazeux N_2 selon le schéma de la figure 8. Le N_2 résulte d'une transformation de NH_4^+ en N_2 par réaction avec BrOLi dans un appareil de Rittenberg ou de Martin-Ross (A), ou d'une transformation de l'azote organique de la plante en N_2 par minéralisation Dumas (B). L'appareil de mesure utilisé est soit un spectromètre de masse dont l'avantage essentiel est sa précision et l'inconvénient majeur, la quantité d'azote nécessaire à la mesure relativement élevée, de l'ordre de 500 micros grammes, soit un spectromètre optique qui a l'inconvénient d'être moins précis pour des faibles teneurs isotopiques, mais présente l'avantage de n'avoir besoin que de quelques micro grammes d'azote pour la mesure

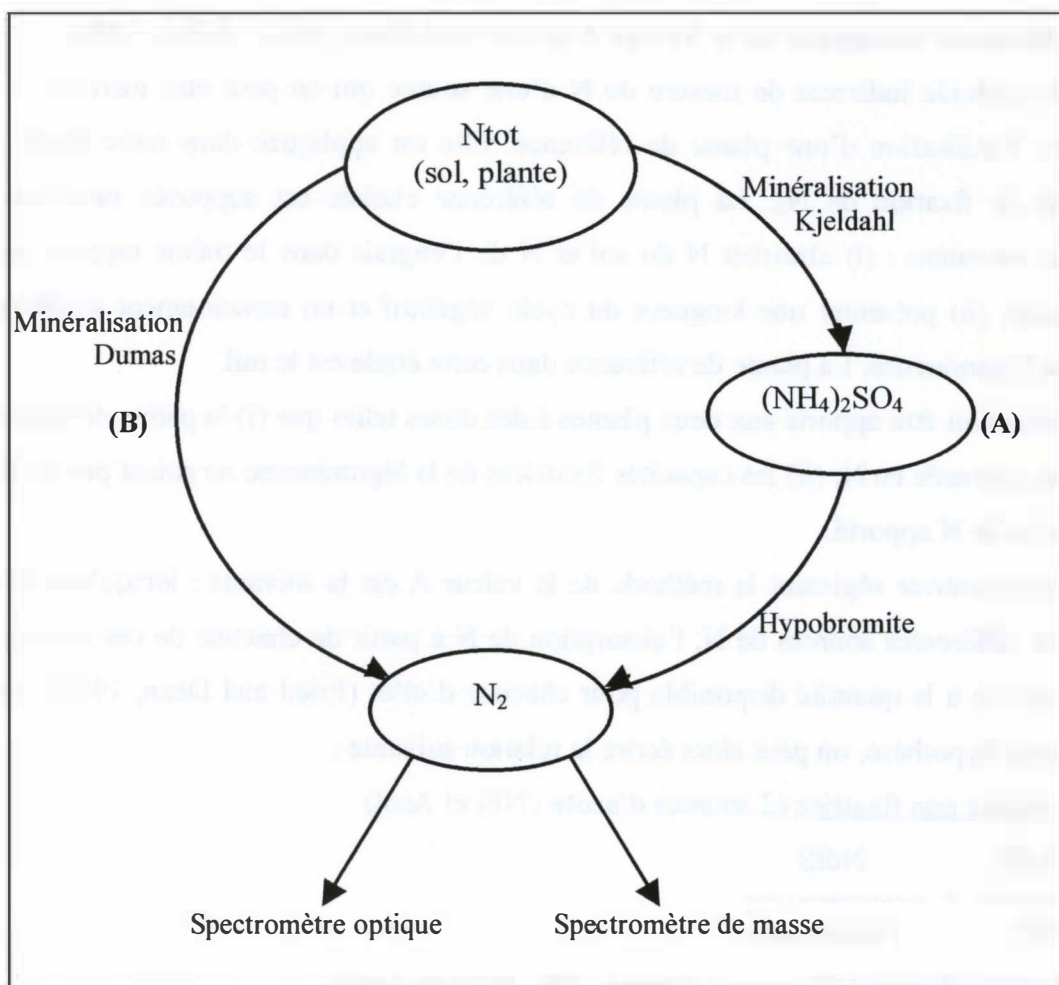


Figure 8 : Schémas montrant les deux méthodes de dosage de l'azote 15 (Guiraud, 1984)
 Les dosages isotopiques dans le cadre de notre travail ont été faits au spectromètre de masse selon le procédé (A) par le laboratoire du CNRS à Lyon (France).

2.2.2 - Méthodes d'analyses des caractéristiques physico-chimiques du sol

Les échantillons de sols sont analysés par le laboratoire du CIRAD selon les méthodes normalisées suivantes : la granulométrie est faite selon la méthode internationale "A" simplifiée (Norme AFNOR X 31-107, 1999a ; le C total et le C organique sont dosés par combustion à l'aide d'un analyseur automatique LECO CHN-600 selon les normes AFNOR NF ISO 106 96, (1996a) ; le N total du sol (N_{tot} sol) est déterminé au moyen d'un analyseur automatique Thermoquest , le N minéral est dosé par colorimétrie automatique sur des extraits au KCl 1M (rapport sol/KCl 1M = 1/10 environ) ; le N minéralisable (N_{av}) est déterminé par la méthode Waring-Bremner (Waring and Bremner, 1964) modifiée par Kandeler (1995); le P assimilable (P_{av}) est extrait suivant la méthode Olsen-Dabin (méthode Olsen modifier par Dabin, 1967) par colorimétrie au bleu de molybdène ; les bases échangeables et la CEC sont

obtenues par la méthode au chlorure de cobaltihexamine selon la méthode de Orsini et Rémy (1976) modifiée par Fallavier et al. (1985) ; le pHeau est déterminé sur un mélange sol/eau selon le rapport 1/2.5 (Normes AFNOR ISO 103 90, 1999b).

2.2.3 - Méthode isotopique de la Valeur A (Fried and Dean, 1952 ; AIEA, 1990)

C'est une méthode indirecte de mesure de N d'une source qui ne peut être marquée à ^{15}N fondée sur l'utilisation d'une plante de référence. Elle est appliquée dans notre étude à la mesure de la fixation de N_2 . La plante de référence choisie est supposée satisfaire les conditions suivantes : (i) absorber N du sol et N de l'engrais dans le même rapport que la légumineuse, (ii) présenter une longueur du cycle végétatif et un enracinement similaires à ceux de la légumineuse. La plante de référence dans cette étude est le mil.

Le N engrais doit être apporté aux deux plantes à des doses telles que (i) la plante de référence ne soit pas carencée en N, (ii) les capacités fixatrices de la légumineuse ne soient pas inhibées par un excès de N apporté.

L'hypothèse centrale régissant la méthode de la valeur A est la suivante : lorsqu'une plante dispose de différentes sources de N, l'absorption de N à partir de chacune de ces sources est proportionnelle à la quantité disponible pour chacune d'elles (Fried and Dean, 1952). Sur la base de cette hypothèse, on peut alors écrire la relation suivante :

Pour une plante non fixatrice (2 sources d'azote : NF_1 et Asol)

$$\frac{\text{NdfF}_1}{\text{NF}_1} = \frac{\text{NdfS}}{\text{Valeur Asol}}$$

Pour une plante fixatrice (3 sources d'azote : NF_2 , NFix et Asol)

$$\frac{\text{NdfF}_2}{\text{NF}_2} = \frac{\text{NdfS}_1}{\text{Valeur Asol}} = \frac{\text{NdfFix}}{\text{Valeur AFix}} = \frac{\text{NdfS}_1 + \text{NdfFix}}{\text{Valeur Asol+Fix}} = \frac{100 - \text{NdfF}_2}{\text{Valeur Asol+Fix}}$$

Connaissant Asol, on en déduit AFix :

$$\text{AFix (en équivalent engrais)} = \text{Asol+fix} - \text{Asol}$$

Connaissant AFix, on en déduit NdfFix :

$$\text{NdfFix} = \text{AFix} \times \frac{\text{NdfF}_2}{\text{NF}_2}$$

2.3 - Les différentes approches du bilan de l'azote

Les méthodes quantitatives d'estimation des flux *in situ* se résument en trois types : les méthodes qui consistent à comptabiliser l'azote dans les différents compartiments du système sur une période de plusieurs années, les méthodes isotopiques : dilution isotopique, « valeur

A » et « abondance naturelle » qui s'appliquent aux céréales et aux légumineuses, applicable sur une année, et les méthodes combinant les deux. Nous adopterons la première et la deuxième pour la céréale uniquement.

- Bilan de l'azote sur plusieurs années (sans utilisation de ^{15}N)

La méthodologie utilisée est fondée sur la méthode des bilans, appliquée aux résultats d'essai longue durée (Wetselaar et Ganry, 1982).

Sur une période de « t » année de culture, on a la relation suivante :

$$\Delta N = \sum_{t_0}^m (\text{inputs}) - \sum_{t_0}^m (\text{outputs}) \quad (1)$$

avec :

$$\Delta N = N \text{ total sol à l'arrivée (N}_{\text{tot sol } t_n}) - N \text{ total sol au départ (N}_{\text{tot sol } t_0}) \quad (2)$$

$$\sum_{t_0}^m (\text{inputs}) = \text{somme de toutes les entrées de N dans le système pendant toute la période considérée}$$

$$\sum_{t_0}^m (\text{outputs}) = \text{somme de toutes les sorties de N dans le système pendant toute la période considérée}$$

Dans les système étudiés, les inputs N sont connus (soit mesurés soit tirés de la bibliographie). En revanche, une partie seulement des outputs N est connue, l'autre partie est alors identifiée comme « outputs inconnus ». La relation (1) ci-dessus peut alors être écrite comme suit :

$$\Delta N = \sum_{t_0}^m (\text{inputs}) - \sum_{t_0}^m (\text{outputs connus}) - \sum_{t_0}^m (\text{outputs inconnus}) \quad (3)$$

Les outputs inconnus représentent les pertes globales de N du système étudié à partir de cette relation tirée de l'équation (3) :

$$\sum_{t_0}^m (\text{outputs inconnus}) = \sum_{t_0}^m (\text{inputs}) - \sum_{t_0}^m (\text{outputs connus}) - \Delta N$$

En désignant par :

X le terme $\sum_{t_0}^m (\text{outputs inconnus})$;

Y le terme $\sum_{t_0}^m (\text{inputs})$;

Z le terme $\sum_{t_0}^m (\text{outputs connus})$;

L'équation (3) devient

$$X = Y - Z + N_{\text{tot sol } t_0} - N_{\text{tot sol } t_n} \quad (4)$$

En zone tropicale l'accélération du cycle de la matière organique permet d'atteindre plus rapidement l'équilibre organique au sein du système, moins de 10 ans d'après Dommergues et Mangenot (1970). Dans un système à l'équilibre organique on aura :

$$\Delta N = 0 \Rightarrow X = Y - Z$$

Les données utilisées pour les calculs sont soit mesurées soit issues de la bibliographie :

- (1) mesurées : $N_{tot\ sol}$ (t_0 et t_n), $N_{tot\ plante}$ pour N exporté par les plantes et N_F pour N apporté par l'engrais ;
- (2) tirées de la bibliographie : N_p pour les dépositions atmosphériques et pour les pluies (Richard, 1963 ; Roose, 1980 ; Orange et al., 1993 ; Guillobez, 1998); N_{fix} pour le N de la fixation libre et rhizosphérique de N_2 (Wetselaar et Ganry, 1982 ; Von Carlow, 1989 ; Ganry et Dommergues, 1997).

Les différents flux de N étant quantifiables, un bilan de N peut être calculé sur la base de l'approche développée par Wetselaar et Ganry (1982).

- Bilan de l'azote engrais sur une année (utilisation de ^{15}N).

Le bilan global de N engrais s'exprime par la relation suivante :

$$100 - (NiS \% + CRU \%) = \text{Solde du bilan N}$$

Le CRU % et le NiS % sont calculés en utilisant les formules définies plus haut (paragraphe 2.1). Pour le calcul du CRU %, les grains et les pailles sont analysés ; pour le calcul du NiS % les horizons 0-20, 20-30, 30-50, et 50-80 cm sont analysés, prenant en compte la densité apparente (d.a.) du sol de chaque horizon.

On fait l'hypothèse que le solde du bilan correspond aux pertes globales de ^{15}N , à savoir la somme des pertes par lixiviation au-delà de la zone racinaire, par ruissellement et/ou érosion, et par voie gazeuse.

$$\text{Pertes de N engrais hors du système sol-plante (\%)} = 100 - (CRU \% + NiS \%)$$

2.4 – Méthodes de mesure de la minéralisation, de la lixiviation, de la volatilisation et de la dénitrification

2.4.1 – Minéralisation de l'azote

Nous considérons la minéralisation nette à court terme (N_{av}) et la minéralisation nette à long terme et plus particulièrement la nitrification sur une année (Nitrif nette). La première est mesurée *in vitro* par la méthode Waring and Bremner (voir paragraphe 2.2.2) et la deuxième est mesurée au champ : elle consiste en une incubation *in situ* du sol et une extraction également *in situ* de N minéral (NH_4^+ et NO_3^-) après des périodes de 15 jours d'incubation. Protégée de l'absorption racinaire et de la lixiviation, cette méthode mesure la minéralisation nette définie comme :

$$\text{minéralisation nette} = \text{minéralisation brute} - (\text{organisation brute} + \text{dénitrification}).$$

Cette méthode est développée au paragraphe 3.2.

2.4.2 – Lixiviation, volatilisation et dénitrification

La méthode du bilan développée ci-dessus (paragraphe 2.3) donne une estimation globale des pertes mais ne permet pas d'en connaître les causes et la part respective de ces causes dans les pertes globales. C'est la raison pour laquelle nous avons tenté une estimation de la lixiviation, de la volatilisation et de la dénitrification potentielle. Pour la lixiviation, nous avons adopté la méthode développée par Pieri (1982) puis par Cissé (1986) fondée sur la mesure *in situ* du bilan hydrique, du drainage, ainsi que sur la mesure de la teneur en N de la solution du sol à une profondeur donnée. Pour la volatilisation, nous avons utilisé la méthode développée par Ganry (1990) fondée sur le dosage au laboratoire de l'ammoniac piégé dans une solution d'acide borique après sa volatilisation et son entraînement par un courant d'air à travers un conduit. Pour la dénitrification, la méthode de mesure utilisée est celle mise au point par Hénault et al. (2001) fondée sur le suivi *in vitro* de la capacité du sol à produire et à réduire ou accumuler le N_2O , sans addition de carbone mais à partir d'un apport de nitrates sous des conditions favorables à la dénitrification.

Les différentes méthodes sont développées respectivement dans les chapitres 6, 7 et 8.

2.5 - Les sites expérimentaux

Les expérimentations sont conduites en station (station de recherches agricoles de Saria), en milieu paysan à Thiougou (centre-sud du Burkina Faso), et dans les Laboratoires de l'INERA (Burkina Faso), du CIRAD à Montpellier et de l'INRA à Dijon (France). Nous présenterons les deux essais majeurs de notre étude : un essai longue durée en station et un essai en milieu paysan.

- L'essai longue durée (essai « Entretien de la fertilité » de Saria, annexe 1a)

Il s'agit d'un essai mis en place en 1960, pour suivre l'évolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de différents systèmes de culture et de fumures minérales et organiques. La fertilisation et l'amendement du sol ont été réajustés en 1978 mais sans remettre en cause la définition des traitements tout comme le dispositif et les techniques culturales appliquées sur l'ensemble de l'essai (préparation, semis à la bonne date, respect de la densité de semis pour chaque culture, démariage précoce, sarclo-binages précoces et réguliers).

- Trois systèmes de culture sont mis en œuvre :

- a – monoculture de sorgho,

- b - rotation sorgho-cotonnier,

- c - rotation sorgho-légumineuse (arachide jusqu'en 1973, niébé depuis cette date).

- Six traitements de fertilisation sont appliqués :

T₁ : témoin absolu désigné par **te** ;

T₂ : fumure minérale faible (37-23-14-6S-1B pour le sorgho, 21-35-21-9B-1.5S pour le cotonnier et 14-23-14-6S-1B pour la légumineuse) + recyclage des pailles de sorgho, désigné par **fmr** ;

T₃ : fumure minérale faible + fumier (5 t ha⁻¹ 2ans⁻¹) + exportation des pailles de sorgho, désigné par **fmo** ;

T₄ : fumure minérale faible sans fumier (T₃ sans fumier), désigné par **fm** ;

T₅ : fumure minérale forte (60-23-44-6S-1B pour le sorgho, 74-46-38-12S-2B pour le cotonnier, et, 14-23-44-6S-1B pour la légumineuse), + fumier (40 t ha⁻¹ 2ans⁻¹) + exportation des pailles de sorgho désigné par **FMO** ;

T₆ : fumure minérale forte sans fumier (T₅ sans fumier), désigné par **FM**.

Les traitements utilisés pour les différentes expériences au champ sont : te, fm, fmo, FM et FMO. Le fumier et les engrais sont enfouis par labour au semis. L'urée est fractionnée au semis, à la montaison et à la floraison et enfoui par sarclo-binage. En 1978 et 1988, un chaulage uniforme a été réalisé sur l'ensemble de l'essai à raison de 1.5 t ha⁻¹ de chaux agricole (74 % CaO) enfouie par labour. Les différentes variétés utilisées sont celles recommandées à la vulgarisation dans la zone agroclimatique. La composition minérale du fumier est analysée à chaque apport (annexe 1 b).

Les expérimentations avec ¹⁵N sont réalisées sur les parcelles de cet essai et correspondent aux traitements te, fm et fmo de la série a (culture continue) et de la série c (rotation sorgho-niébé) des 4 répétitions intérieures (annexe 1 a).

- Les essais en milieu paysan (Thiougou, carte 4 et annexe 2)

Les 24 sites des essais sont choisis de façon à couvrir l'ensemble des situations du terroir, position topographique, types de champs, passé cultural, niveau de technicité du producteur, types de sols etc (carte 4). Les essais sont conduits en maïs (variété SR21) avec 2 répétitions par essai. Chaque essai comprend 2 traitements : un traitement qui reçoit une fertilisation N P K de 80 kg N ha⁻¹, 35 kg P₂O₅ ha⁻¹, 58 kg K₂O ha⁻¹ et un traitement 0N plus la même fertilisation PK. L'engrais N est apporté sous forme d'urée marqué ¹⁵N, l'engrais P sous forme de super triple phosphate (46 % P₂O₅) et l'engrais K sous forme de chlorure de potassium (60 % K₂O). Pour chaque champ, deux placettes de rendement de 4.8 m x 3.6 m sont mises en place. Au centre de la placette avec fertilisation azotée, une sous parcelle ¹⁵N de

surface 6.4 m² est délimitée dont la zone centrale (1.92 m²) et utilisée pour l'échantillonnage ¹⁵N des plantes (annexe 2). Sur l'ensemble des parcelles, les interventions culturales sont laissées à l'initiative des agriculteurs.

Rapport-Gratuit.com

3 - <u>Chapitre 3 : MINÉRALISATION DE L'AZOTE DANS LES SOLS</u> <u>SOUS CULTURES</u>	42
3.1 – Introduction.....	42
3.2 - Matériel et méthodes.....	42
3.2.1 – Les sites expérimentaux.....	42
3.2.2 – Principe de la méthode de mesure de N minéralisé <i>in situ</i>	44
3.3.3 – Dispositif de mesure de la minéralisation.....	45
3.3 – Résultats.....	45
3.3.1 - En station.....	45
3.3.2 - En milieu paysan.....	48
3.4 - Discussion.....	52

3 - Chapitre 3 : MINÉRALISATION DE L'AZOTE DANS LES SOLS

SOUS CULTURES.

3.1 - Introduction

En sols cultivés exondés l'azote minéral est principalement présent sous forme nitrique. La quantité de nitrates ($Q\ N-NO_3^-$) mise en jeu durant une année dans le sol (nitrification brute) est la source de nitrates à partir de laquelle s'opèrent les 3 processus majeurs du cycle interne de l'azote dans le sol : l'absorption par la plante (NdfS), la lixiviation (NI), la dénitrification (N_2) et l'immobilisation (NiS). Nous définissons la nitrification nette désignée par Nitrif nette ($kg\ ha\ an^{-1}$), comme la différence entre la nitrification brute d'une part et l'organisation brute et la dénitrification d'autre part, en absence de lixiviation. Cette Nitrif nette est une donnée essentielle à connaître pour une gestion optimale de l'azote (offre / demande) et pour évaluer le risque de perte d'azote. La Nitrif nette d'un sol se mesure classiquement au laboratoire et l'utilisation de ^{15}N permet le calcul des flux bruts (Mary et Recous, 1993), mais les valeurs obtenues ne sont que des indicateurs de la Nitrif nette *in situ*. La Nitrif nette *in situ* se mesure usuellement par dosage de $N-NO_3^-$ sur des prélèvements de sol à intervalles réguliers durant toute une année. Cette méthode indirecte encore appelée « dynamique de $N-NO_3^-$ » rend compte de la présence à un instant donné d'une quantité de $N-NO_3^-$ dans le sol qui est la résultante des processus ci-dessus mentionnés (NdfS, NI, NiS) mais ne permet pas de quantifier la Nitrif nette *in situ*. Pour approcher cette Nitrif nette *in situ* la-dite méthode usuelle a été perfectionnée : elle consiste en une incubation *in situ* du sol et une extraction également *in situ* de N minéral : $N-NH_4^+$ et $N-NO_3^-$. C'est cette dernière méthode que nous avons utilisée.

Les résultats de N minéralisé et nitrifié *in situ* permettent une quantification approchée de la minéralisation nette et de la Nitrif nette durant une année et plus précisément sur un cycle cultural. On fait l'hypothèse que cette Nitrif nette représente la source principale de N (à laquelle il faut ajouter la nitrification rhizosphérique) disponible pour la plante et susceptible d'être perdu (figure 1).

3.2 – Matériel et méthodes

3.2.1 - Les sites expérimentaux

En station

L'étude est réalisée sur 3 traitements et 4 répétitions de l'essai longue durée de Saria : témoin absolu (te), fumure minérale sans fumier (fm) et fumure minérale + fumier (fmo) de la série a (monoculture de sorgho) (annexe 1a).

En milieu paysan

L'étude est réalisée dans 15 sites du terroir de Thiougou cultivé en maïs. Les sites sont choisis sur la base de 3 critères principaux : position géographique dans le terroir, type de champ et toposéquence. La position géographique est le critère qui permet de mieux couvrir le terroir. Le critère « type de champ » permet de tenir compte des 3 types de champ habituel qui sont : (i) les champs de case qui reçoivent une forte fertilisation mais non maîtrisée (matière organique, engrais) ; (ii) les champs de brousse qui, éloignés du village, ne sont pas fertilisés mais bénéficient quelquefois de jachères de courte durée (1 à 2 ans), leurs résidus culturaux sont totalement exportés ; (iii) les champs intermédiaires qui reçoivent une faible fertilisation minérale et organique. Ces types de champs présentent des caractéristiques physico-chimiques allant dans le sens d'un appauvrissement des champs de brousse vers les champs de case (tableau 2). Le maïs est cultivé dans les champs de case en priorité, parfois dans les champs intermédiaires et dans les champs de brousse particulièrement fertiles. Le critère toposéquence permet de prendre en compte les sites de haut de pente et ceux de mi-pente sur lesquels ont trouvé les champs de maïs ; les sites de bas de pente, caractérisés par des sols hydromorphes et qui sont utilisés pour les cultures de tubercules (patate douce, igname et autres plantes à tubercules) et de riz de bas-fonds, ne sont pas retenus pour cette étude. Chaque essai comprend 2 traitements et 2 répétitions : un traitement sans engrais azoté et un traitement avec 80 kg N ha⁻¹ appliqués pour la deuxième année consécutive

Tableau 2 : Caractéristiques des différents types de champs en milieu paysan.

	Champs de cases	Champs intermédiaires	Champs de brousse
* Distance moyenne par rapport au village ou à la ferme (km)	0 à 0,5	0,5 à 3	> 3
Argile %	7,9		9,1
C tot. %	1,10 - 2,20	0,5 - 1,0	0,20 - 0,40
Ntot. %	0,95 - 1,75	0,55 - 0,85	0,23 - 0,45
CEC cmol(+) kg ⁻¹	4,20 - 12,00	3 - 4,2	2,40 - 3,00
Ca ⁺⁺ cmol(+) kg ⁻¹	2,25 - 10,25	1,30 - 1,60	0,85 - 1,30
Mg ⁺⁺ cmol(+) kg ⁻¹	1,30 - 5,15	0,9 - 1,30	0,30 - 0,85
K ⁺ cmol(+) kg ⁻¹	0,45 - 2,35	0,40 - 1,10	0,06 - 0,13
P assi. ppm	20 - 220	13 - 16	05 - 016
pH eau	6,70 - 8,30	5,8 - 7	5,8 - 6,2
pH KCl	6,40 - 7,50	4,6 - 5,5	4,2 - 5,3

Source : Sedogo (1981) ; * : Bonzi (1999)

3.2.2 - Principe de la méthode de mesure de N minéralisé *in situ*

L'objectif est de quantifier l'azote minéralisé dans l'horizon 0-20 cm du sol pendant une période allant d'un temps t_0 à un temps t_n dans les conditions réelles. La méthode utilisée est celle de Raison et al. (1991) et de Schinner et al. (1995), adaptée par Oliver (1999), dont le principe est le suivant : on réincorpore une aliquote d'un échantillon de sol non remanié dans un cylindre en PVC muni, à sa partie supérieure d'un couvercle et à sa partie inférieure d'un grillage de très fines mailles (fig.9) afin de prévenir les fuites par lixiviation d'une part et les perturbations par la faune du sol d'autre part. L'échantillon (cylindre contenant le sol non remanié) est ensuite replacé *in situ* dans le trou de prélèvement et laissé en place pendant deux semaines. L'azote minéral est extrait par une solution de KCl molaire avant et après incubation.

Ces résultats permettent : (1) de décrire la « dynamique de N-NO_3^- dans le sol à partir des résultats du dosage N-NO_3^- dans les prélèvements successifs, (2) de mesurer la vitesse de nitrification (Vit nitrif) et, en corollaire, la nitrification nette (Nitrif nette) *in situ*. La vitesse de nitrification est obtenue par :

$$\text{Vit nitrif (mg kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}) = \frac{Q \text{ N-NO}_3^- t_n - Q \text{ N-NO}_3^- t_0}{t_n - t_0}$$

avec :

$Q \text{ N-NO}_3^- t_0$: quantité de nitrates mesurée dans le sol avant incubation *in situ* ;

$Q \text{ N-NO}_3^- t_n$: quantité de nitrates mesurée dans le même sol à la fin de l'incubation *in situ* ;

$t_n - t_0$: durée d'incubation *in situ*.

La nitrification nette (Nitrif nette) est obtenue par :

$$\text{Nitrif nette (kg ha}^{-1}) = \text{Vit nitrif} \times (t_n - t_0) \times Q_{\text{terre}}$$

Q_{terre} désigne la quantité de terre sur un hectare calculée sur la base de la densité apparente du sol (donnée mesurée dans cette étude) et de l'horizon considéré (0 - 20 cm dans la présente étude).

Une Vit nitrif négative correspond à une diminution de $Q \text{ N-NO}_3^-$ durant l'incubation due vraisemblablement à une dénitrification et/ou immobilisation microbienne de N-NO_3^- . Rappelons que les microorganismes hétérotrophes assimilent le N minéral sous forme de NH_4^+ ou NO_3^- , mais de préférence NH_4^+ . En présence de sources carbonées, on fait l'hypothèse que l'immobilisation de NO_3^- est peu probable si l'ammonification se poursuit mais possible aux dépens du reliquat NO_3^- si celle-ci est arrêtée (Nicolardot, communication personnelle).

3.2.3 - Le Dispositif de mesure de la minéralisation

- Incubation *in situ* :

Le cylindre d'incubation (fig.9) est réalisé en PVC de diamètre courant (8cm). Il est muni de deux trous d'aération de 1 cm environ de diamètre, situés à 3 cm environ du bord supérieur du tube. La hauteur du cylindre est fonction de l'horizon concerné par l'étude. Pour l'horizon 0-20 cm, une hauteur de 25 cm suffit. La grille, de préférence en inox, recouvre le fond du cylindre sur lequel elle reste solidaire après avoir été fixée à chaud.

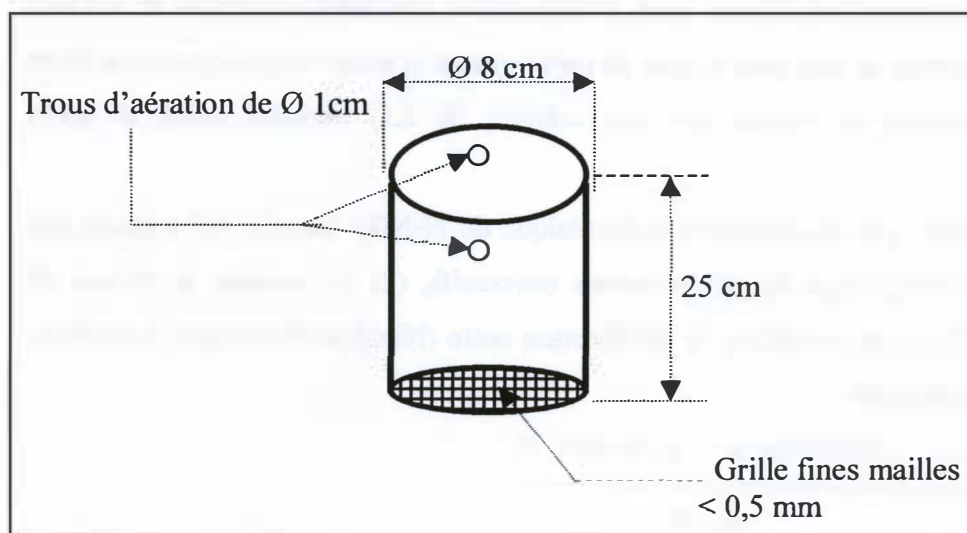


Figure 9 : Schéma d'un cylindre en PVC pour les incubations *in situ*

Dans chaque parcelle élémentaire, on dispose 3 cylindres d'incubation afin d'obtenir une meilleure couverture.

- L'extraction *in situ* de l'azote minéral du sol.

La technique utilisée est celle mise au point par Oliver (1994) : l'extraction de N minéral est faite *in situ* à l'aide du KCl après une agitation de la solution KCl + terre pendant au moins 1 heure. Les solutions sont transférées dans des vénojects stériles à travers les filtres stériles à usage unique, et expédiées pour les analyses au laboratoire.

3.3 – Résultats

3.3.1 - En station

La dynamique de N-NO_3^- présente trois phases (figure 10 et annexe 3a) :

1^{ière} phase : cette phase couvre les mois de mai et juin et correspond au début de la saison des pluies ; elle est caractérisée par une augmentation des N-NO_3^- avec un pic en fin juin ($13 \text{ mg kg}^{-1} \text{ sol}$ pour le traitement avec fumier (fmo), $7 \text{ mg kg}^{-1} \text{ sol}$ pour le traitement sans fumier (fm) et le témoin (te)) ;

2^{ème} phase : cette phase couvre la période allant de juillet à mi-octobre et correspond à la pleine saison des pluies ; elle est caractérisée par la baisse de N-NO_3^- dans le sol à des intensités variables selon le traitement (moins de $1 \text{ mg kg}^{-1}\text{sol}$ pendant toute la période pour te, environ $1 \text{ mg kg}^{-1}\text{sol}$ en début et $12 \text{ mg kg}^{-1}\text{sol}$ en fin de période pour fmo, de $1 \text{ mg kg}^{-1}\text{sol}$ en début à $6 \text{ mg kg}^{-1}\text{sol}$ maximum en fin de période pour fm) ;

3^{ème} phase : cette phase couvre le reste de l'année à partir de la fin octobre et correspond à la fin de la saison des pluies (début de la saison sèche) d'octobre à novembre et à la saison sèche de décembre à avril ; elle est caractérisée par une augmentation de N-NO_3^- par rapport à la 2^{ème} phase : $2 \text{ mg kg}^{-1}\text{sol}$ pour te, $3 \text{ mg kg}^{-1}\text{sol}$ pour fm et $8 \text{ mg kg}^{-1}\text{sol}$ pour fmo.

La vitesse de nitrification (Vit nitrif) est représentée à la figure 11 et à l'annexe 3b. La Vit nitrif présente le même nombre de phases que pour la dynamique de N-NO_3^- : elle est négative en début et en fin de saison des pluies et positive en pleine saison des pluies (par ordre décroissant : fm, fmo et te). La Vit nitrif négative en début et en fin de saison des pluies correspond à des périodes durant lesquelles on enregistre des pertes de N-NO_3^- par immobilisation et/ou par dénitrification.

La nitrification nette (Nitrif nette) varie d'un traitement à l'autre. En effet, elle est de $27 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour te, de $60 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour fm et de $31 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour fmo. La différence entre la Nitrif nette de fm et celle de fmo semble paradoxale. En réalité, seule la connaissance de la nitrification brute permettrait de se prononcer sur l'effet des traitements. Le tableau 3 (qui découle de l'annexe 3b) et la figure 12 représentent les Nitrif nette dans le sol pendant une période d'une année pour tous les traitements.

Tableau 3 : Quantités de N-NO_3^- mis en jeu par la nitrification nette pendant une année en station

Traitement	Nitrif nette		
	mg kg^{-1}	$\text{kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$	ecartype
te	8.22	26.6	0.06
fm	18.74	59.6	0.05
fmo	9.48	30.7	0.21

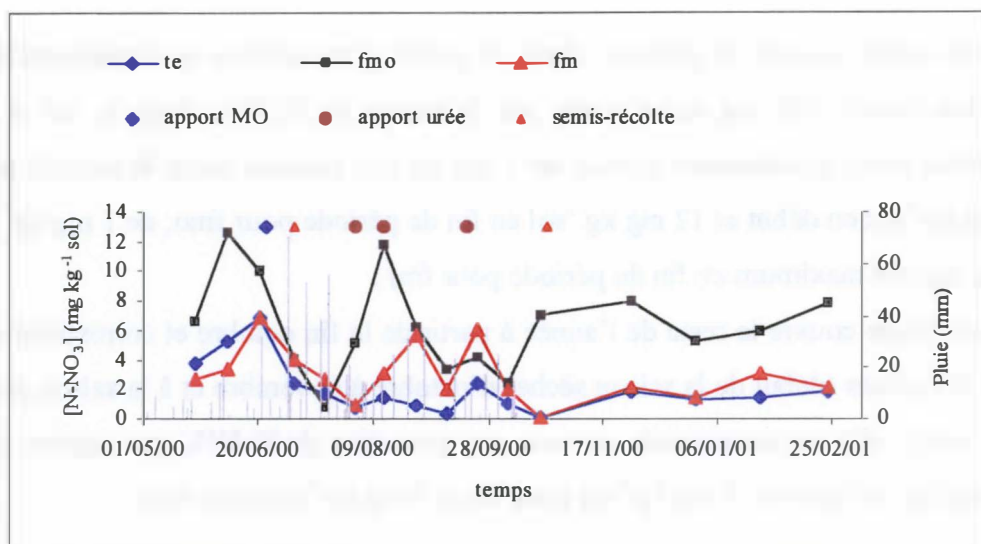


Figure 10 : Dynamique de N-NO_3^- dans trois traitements de l'essai longue durée de Saria

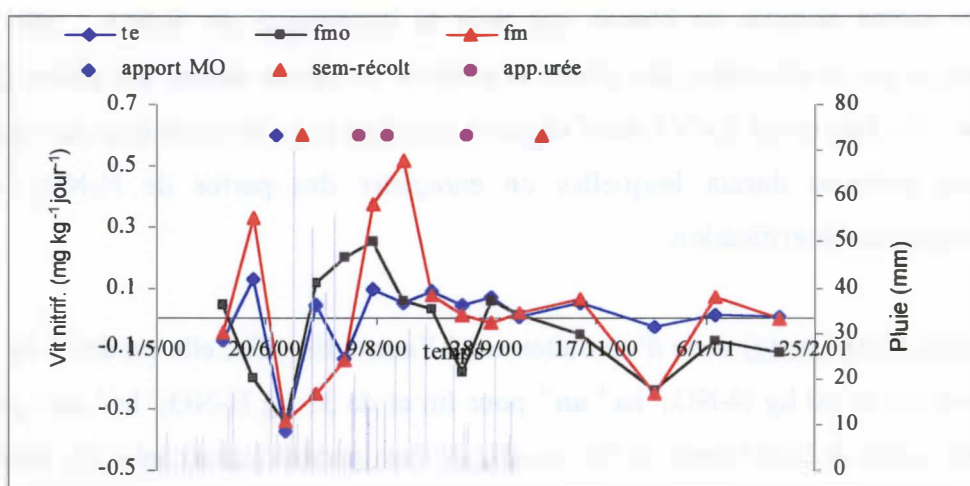


Figure 11 : Vitesses de nitrification (Vit nitrif) dans les sols de 3 traitements de l'essai longue durée de Saria.

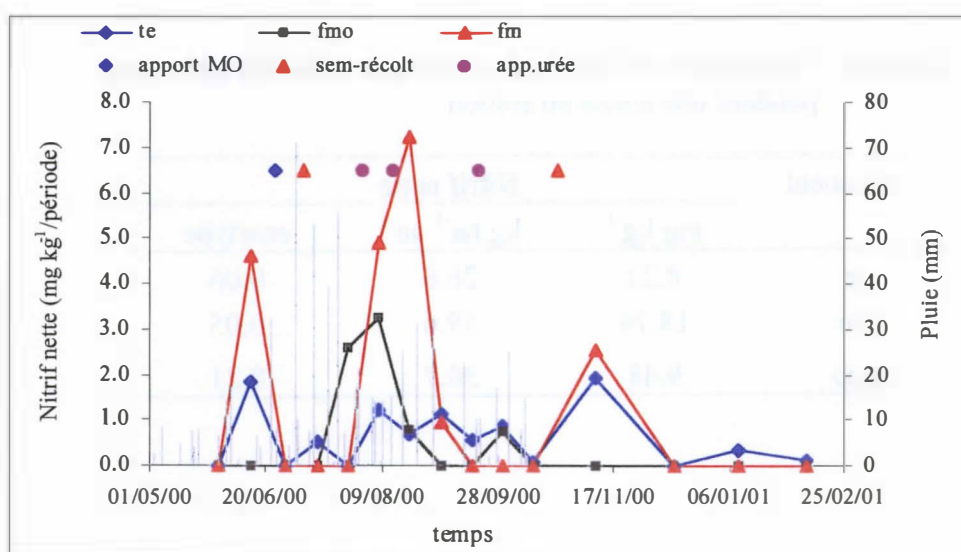


Figure 12 : Nitrification nette (Nitrif nette) pendant une année en station, essai longue durée de Saria.

3.3.2 - En milieu paysan

Les figures 12a à 12l représentent chaque situation étudiée (champs de case, champs de brousse et champs intermédiaires, toposéquence) ; l'ensemble des résultats est en annexe 3c de ce document. Pour chaque champ on représente la dynamique de N-NO_3^- à la figure de gauche et les Vit nitrif à la figure de droite.

3.3.2.1 - Observations sur les dynamiques de N-NO_3^-

Champs de case

En haut de pente (figure 12a) trois phases sont observées :

- (1) un pic de nitrification en début de saison des pluies (juin à mi-juillet) avec des concentrations en nitrates allant de 15 à 25 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$ (avant les apports d'engrais) ;
- (2) une forte baisse de la nitrification avec des concentrations de nitrates passant de 20 à moins de 1 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$ pendant tout le reste de la saison des pluies (on observe cependant une légère remontée des concentrations 15 jours après la 1^{ère} chute suivie de la baisse définitive). L'apport d'urée (80 kg N ha^{-1}) augmente les concentrations en nitrates de ce traitement ;
- (3) une remontée de la nitrification après la saison des pluies avec des concentrations en nitrates allant de 5 à 8 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$, suivi d'une tendance à la baisse dans le temps.

A mi-pente (figure 12c) la dynamique de N-NO_3^- est similaire à celle observée dans les sols des champs de case du haut de pente, avec cependant des concentrations en nitrates plus élevées pouvant atteindre 40 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$ en pic de début de saison des pluies dans certains champs.

Champs intermédiaires

En haut de pente (figure 12e) et à mi-pente (figure 12g), ces champs présentent les mêmes dynamiques de N-NO_3^- que celles des sols de champs de case. En effet on observe un pic de nitrification relativement élevé en début de saison des pluies avec des concentrations en nitrates allant de 15 à 25 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$ selon les cas.

Champs de brousse

En haut de pente (figure 12i) la dynamique de N-NO_3^- est globalement similaire à celle obtenue dans les champs de case, mais les concentrations en nitrates par phase sont beaucoup plus faibles : moins de 10 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$ en début de saison des pluies ; de 1 à 2 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$ pendant toute la saison des pluies ; moins de 1 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$ après la saison des pluies. A mi-pente (figure 12k), la dynamique de N-NO_3^- est globalement similaire à celle obtenue dans les champs de brousse haut de pente avec cependant des concentrations en nitrates plus élevées en début de saison des pluies : 12 à 13 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$.

3.3.2.2 - Observations sur la vitesse de nitrification (Vit nitrif)

Rappelons que la vitesse de nitrification (Vit nitrif) exprime la production journalière de N-NO_3^- dans le sol.

Champs de case

En haut de pente (figure12b) les Vit nitrif observées dans les sols de ces champs sont : négatives pendant les premiers mois de la saison des pluies (juin) avec $-1.0 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ j}^{-1}$; positives pendant la saison des pluies (juillet à octobre) avec des valeurs allant de 0.5 à 1.8 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ j}^{-1}$, les valeurs les plus faibles sont celles du traitement sans engrais ; et négatives à nulles pendant le reste de la saison (début de la saison sèche). A mi-pente (figure12d) les Vit nitrif évoluent de la même manière dans le temps que celles du haut de pente. Elles sont cependant plus importantes pendant la saison des pluies (1.5 à 2.5 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ j}^{-1}$) et restent positives jusqu'à la mi-novembre.

Champ intermédiaire

En haut de pente (figure12f) les Vit nitrif sont similaires à celle des champs de case du haut de pente. A mi-pente (figure12h) les Vit nitrif sont par contre identiques à celles des sols de champ de case à mi-pente.

Champs de brousse

En haut de pente (figure12j) les Vit nitrif sont plus importantes que celles observées dans les sols des champs de case en début de saison des pluies ($-0.5 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ j}^{-1}$). Par contre elles sont plus faibles pendant le reste de la saison des pluies (0.5 à 1.5 $\text{mg kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$). A mi-pente (figure12l) les Vit nitrif sont identiques à celles des sols de champ de case en haut de pente.

En résumé les vitesses de nitrification sont négatives en début et en fin de saison des pluies (-2 à $-0.5 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ j}^{-1}$), et positives pendant la pleine saison des pluies de juillet à septembre (0.5 à 2.5 $\text{mg N-NO}_3^- \text{ kg}^{-1} \text{ j}^{-1}$).

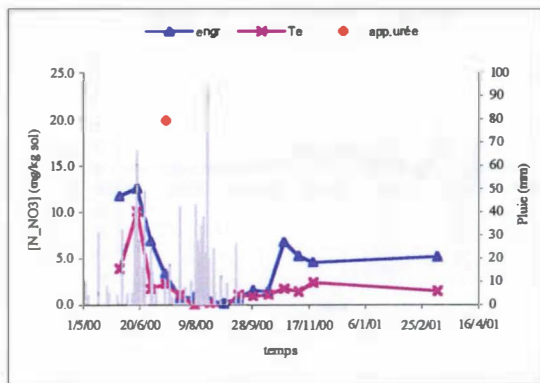


Figure 12a : Dynamique de N-NO₃⁻ dans le sol d'un champ de case du haut d'une toposéquence (producteur 12)

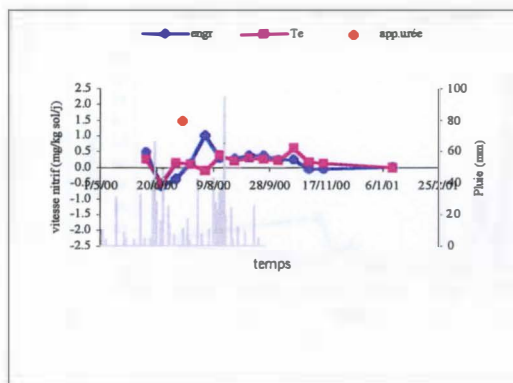


Figure 12b : Vitesse de nitrification dans le sol d'un champ de case du haut d'une toposéquence (Producteur 12)

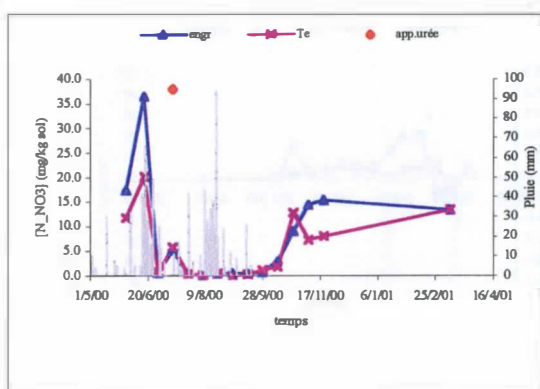


Figure 12c : Dynamique de N-NO₃⁻ dans le sol d'un champ de case situé à mi-pente (Producteur 9)

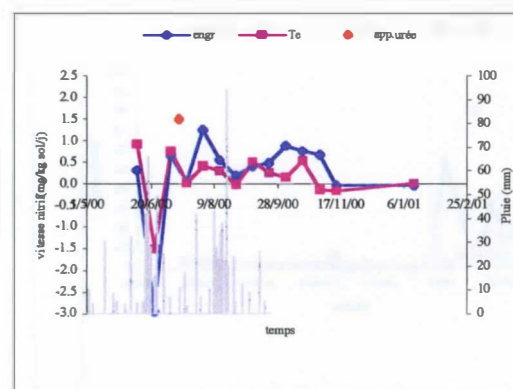


Figure 12d : Vitesse de nitrification dans le sol d'un champ de case situé à mi-pente (Producteur 9)

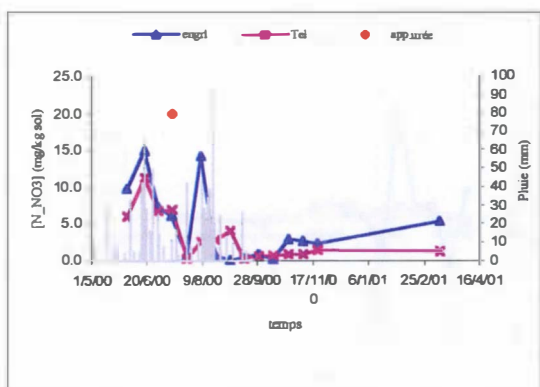


Figure 12e : Dynamique de N-NO₃⁻ dans le sol d'un champ intermédiaire de haut d'une toposéquence (producteur 14)

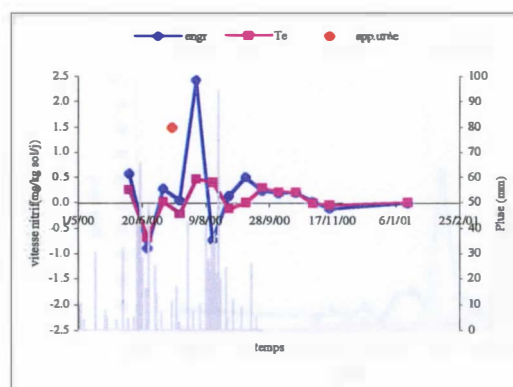


Figure 12f : Vitesse de nitrification dans le sol d'un champ intermédiaire de haut d'une toposéquence (Producteur 14)



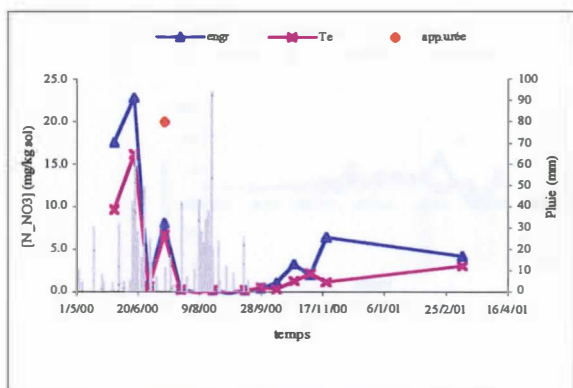


Figure 12g : Dynamique de N-NO₃⁻ dans le sol d'un champ intermédiaire situé à mi-pente (Producteur 11)

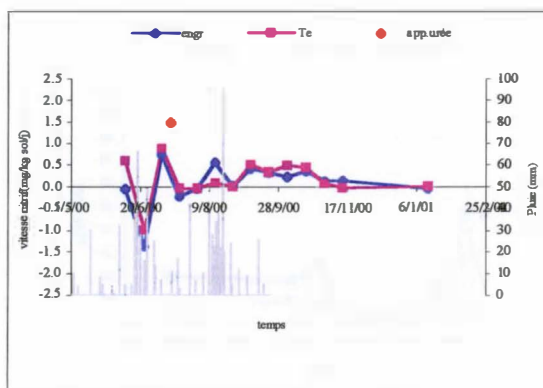


Figure 12h : Vitesse de nitrification dans le sol d'un champ intermédiaire situé à mi-pente (Producteur 11)

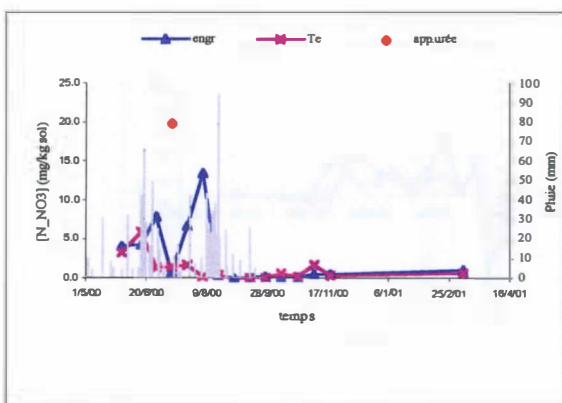


Figure 12i : Dynamique de N-NO₃⁻ dans le sol d'un champ de brousse du haut d'une toposéquence (producteur 5)

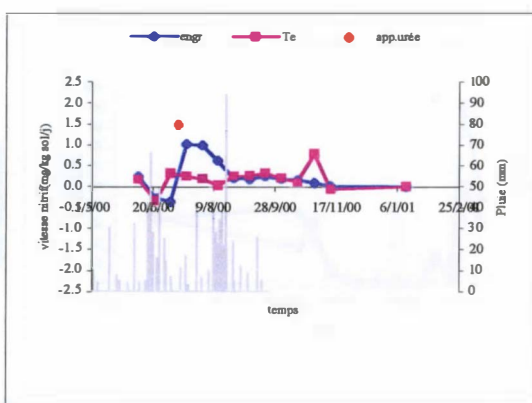


Figure 12j : Vitesse de nitrification dans le sol d'un champ de brousse du haut d'une toposéquence (Producteur 5)

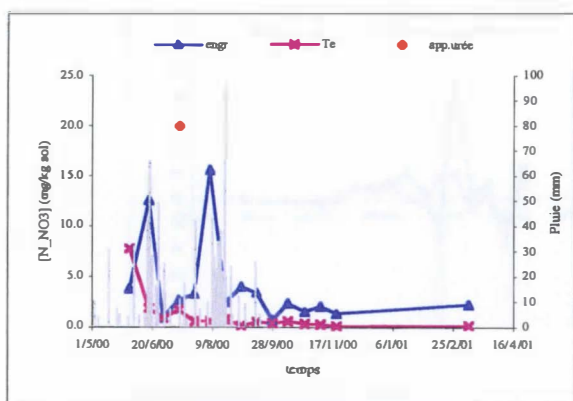


Figure 12k : Dynamique de N-NO₃⁻ dans le sol d'un champ de brousse situé à mi-pente (Producteur 8)

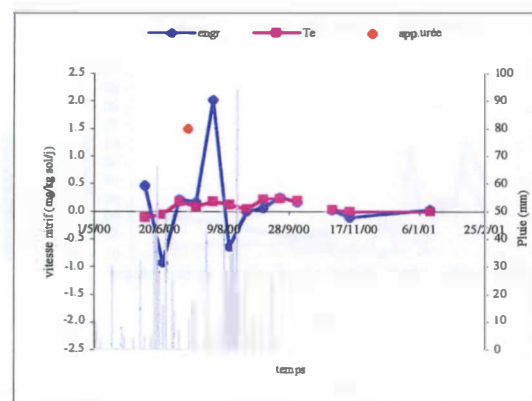


Figure 12l : Vitesse de nitrification dans le sol d'un champ de brousse situé à mi-pente (Producteur 8)

3.3.2.3 - Observations sur la nitrification nette (Nitrif nette) dans les sols pendant une année.

Le tableau 4 représente les moyennes des Nitrif nette pendant une année

Tableau 4 : Nitrif nette ($\text{kg ha}^{-1}\text{an}^{-1}$) dans les sols en milieu paysan

Site	type champ	toposéquence	0N	80N	
			$\text{kg ha}^{-1}\text{an}^{-1}$	$\text{kg ha}^{-1}\text{an}^{-1}$	ecartype
2	cb	hp	56.04	127.64	0.20
3	cb	hp	35.29	91.36	0.19
5	cb	hp	113.82	152.40	0.14
7	cb	hp	53.16	125.70	0.20
8	cb	mp	50.60	118.86	0.22
Moyenne cb			61.78	123.19	0.19
1	cc	hp	73.83	123.35	0.20
4	cc	hp	139.62	137.37	0.17
6	cc	hp	76.43	158.67	0.16
9	cc	mp	127.65	260.12	0.21
10	cc	hp	74.47	70.93	0.10
12	cc	hp	112.85	134.59	0.19
13	cc	mp	112.14	190.40	0.18
15	cc	hp	78.66	160.78	0.17
Moyenne cc			99.46	154.53	0.17
11	ci	mp	118.28	124.32	0.11
14	ci	hp	69.75	169.42	0.19
Moyenne ci			94.01	146.87	0.15

cb : champ de brousse ; cc : champ de case ; ci : champ intermédiaire ;
hp : haut de pente ; mp : mi-pente

La Nitrif nette varie de 62 à 123 $\text{kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}\text{an}^{-1}$ dans les champs de brousse respectivement pour 0N et pour 80N ; elle varie également de 100 à 155 $\text{kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}\text{an}^{-1}$ dans les champs de case respectivement pour 0N et pour 80N et de 94 à 147 $\text{kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}\text{an}^{-1}$ dans les champs intermédiaires respectivement pour 0N et pour 80N.

3.4 - Discussion

La dynamique de N-NO_3^- est caractérisée par 3 phases : la 1^{ière} caractérisée par un pic d'accumulation de nitrates se situe en début de saison des pluies. Ce pic de nitrification est lié à la reprise de l'activité microbienne du sol avec les premières pluies ; la 2^{ième} phase caractérisée par une baisse des concentrations de N-NO_3^- dans le sol couvre toute la saison des pluies. Cette baisse est due à plusieurs facteurs dont l'absorption par les cultures, la lixiviation et la dénitrification ; la 3^{ième} phase caractérisée par une augmentation des nitrates dans les sols se situe en fin de saison des pluies. Cette augmentation des nitrates dans les sols est vraisemblablement due à la minéralisation des résidus végétaux (racines et feuilles mortes) dans le sol encore humide au moment où l'absorption par les plantes et la lixiviation sont nulles.

Ces phases de nitrification mises en évidence sont classiquement observées en zone tropicale à une seule saison des pluies. Décrites la première fois par Blondel (1971b), elles ont été bien expliquées par Dommergues et Mangenot (1970).

La vitesse de nitrification (Vit nitrif) décroît dans l'espace, des champs de brousse vers les champs de case au début de la saison des pluies. L'explication avancée est la suivante : en champ de case, l'ammonification est importante en cette période où le profil 0-20 cm est riche en MOS et encore mal humidifié car les premières pluies sont espacées comme le montrent les figures 3 et 6 ; cette forte ammonification pourrait expliquer ce moindre Vit nitrif. Une fréquence des pluies accrue semble avoir un effet négatif sur la vitesse de nitrification ce qui s'observe de fin juin à début juillet et pendant la dernière quinzaine du mois d'août. La Vit nitrif pose un problème lorsqu'elle est négative ; les hypothèses explicatives sont émises au paragraphe 322. L'hypothèse la plus plausible est la dénitrification surtout pour le traitement fmo à cause de la présence de résidus organiques (fumier) à une période où l'humidité et la température du sol sont favorables à la dénitrification.

La nitrification nette (Nitrif nette) présente 3 phases à l'instar de la dynamique de N-NO_3^- qui en est le corollaire : (i) très peu de nitrates dans le sol pendant la période de mai à juillet (début de la saison des pluies) ; (ii) augmentation des nitrates pendant toute la pleine saison des pluies (août à septembre) avec des pics qui sont fonction du niveau de fertilité du sol ; (iii) très faibles quantités de nitrates (voire nulles) à partir de la mi-octobre (début de saison sèche). La Nitrif nette annuelle est une donnée nécessaire à connaître pour réaliser l'ajustement quantitatif offre/demande mais cette donnée n'est pas suffisante ; il faut disposer d'une autre donnée : la variation dans le temps de la Vit nitrif, et la comparer à la courbe de mobilisation de N de la plante dont la pente indique l'absorption journalière encore appelée demande journalière.

Sur sorgho, Blondel (1971a) a mesuré la demande en N d'une variété d'un cycle de 143 jours en distinguant les stades physiologiques (montaison, épiaison-floraison, maturité). La variété cultivée dans notre expérimentation ayant un cycle plus court (120 j), nous émettons l'hypothèse que sa demande est au moins égale à celle de la variété cultivée par Blondel. L'offre en N par le sol est mesurée par la variable Nitrif nette. La confrontation de l'offre (nos résultats) à la demande (résultats de Blondel) par stade physiologique (tableau 5a) permet de tirer deux enseignements : (i) l'offre en N du sol pendant les stades montaison et épiaison-floraison ne couvre pas la demande quelle que soit la fertilisation. En réalité ce résultat ne nous permet pas de conclure à une carence en N car deux processus peuvent intervenir : la capacité du sorgho à récupérer le N-NO_3^- entraîné en profondeur sur l'ensemble du profil

prospecté par les racines, ce que Waneukem (1995) a déjà montré pour le maïs au Sud du Burkina Faso ; la nitrification rhizosphérique (Reydellet, 1997). Cependant le risque d'une carence en N existe ; (ii) pendant la maturité l'offre en N du sol est supérieure à la demande (surplus de l'ordre de 8 kg ha^{-1}), ce qui permet de conclure à un risque de perte en N-NO_3^- par dénitrification et par lixiviation.

Pour le maïs, en faisant toujours référence à Blondel (1971a) qui a mesuré la demande en N d'une variété de maïs (cycle de 90j), nous émettons l'hypothèse que les besoins en N durant les 3 grandes périodes du cycle végétatif : montaison, floraison et grain pâteux sont les mêmes pour la variété cultivée par Blondel et la nôtre. La confrontation de l'offre (nos résultats) à la demande (résultats de Blondel) est analysée pour les champs de brousse et les champs de case :

(1) champs de brousse (tableaux 5b) : (i) avec la dose de 80 kg N ha^{-1} , 3 champs sur 6 présentent une offre en N du sol supérieure à la demande en N du maïs pendant la montaison, (ii) tous les champs présentent une offre en N du sol inférieure à la demande en N de la plante pendant la floraison, même avec engrais, (iii) pendant le stade grain pâteux et le stade maturité l'offre est de loin supérieure à la demande même sans fertilisation. Pour les situations où la demande est supérieure à l'offre, on ne peut pas conclure à une carence en N pour les mêmes raisons indiquées ci-dessus (remontée de N-NO_3^- , nitrification rhizosphérique). Pour pallier tout risque de carence azotée, il est conseillé d'apporter l'engrais N à une dose supérieure à 80N avec un épandage fractionné soit 50 kg N ha^{-1} en début de cycle et 50 kg N ha^{-1} en fin de montaison. Les pertes en N, probables à la fin du cycle du maïs pourraient être évitées par des cultures relais ;

(2) champs de case (tableaux 5c) : (i) avec la dose de 80 kg N ha^{-1} l'offre du sol en N pendant les périodes de montaison, de grain pâteux et de maturité est largement supérieure à la demande en N de la plante pour 7 champs sur 8, (ii) pendant la floraison l'offre est inférieure à la demande même avec fertilisation pour tous les champs, (iii) on enregistre des excès importants de N pendant la période grain pâteux dans tous les champs de case avec ou sans fertilisation. Pour éviter tout risque de carence en N de maïs pendant la floraison, nous préconisons le fractionnement de l'engrais comme pour les champs de brousse (la dose de 80 kg N ha^{-1} ne change pas). L'utilisation d'une culture relais permettrait également de résorber l'excès de N-NO_3^- en fin de cycle.

Tableau 5a : Offre en N du sol (Nitrif nette) et demande en N du sorgho, variété Sariasio 10, essai longue durée de Saria.

Dates	Stade physiologique, cycle de 120 j	Offre en N du sol (kg ha ⁻¹)			Demande en N du sorgho * (cycle de 143 j) (kg ha ⁻¹)
		te	fin	fino	
06/07/00	semis	2	0	9	
07/08/00	montaison	12	43	13	84
29/09/00	Epiaison / floraison	3	0	2	18
6/11/00	maturité	8	8	0	0

* d'après Blondel (1971a)

Tableau 5b : Offre en N du sol (Nitrif nette) et demande en N du maïs variété SR21, champs de brousse.

Dates	Période physiologique cycle de 120 j	Offre en N du sol (kg ha ⁻¹)										Demande N de la plante *, cycle de 90 j (kg ha ⁻¹)
		site 2		site 3		site5		site 7		site 8		
		0N	80N	0N	80N	0N	80N	0N	80N	0N	80N	
18/06/00	Semis	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
28/06/00												
au	Montaison	11	59	6	50	32	106	5	86	22	96	67
19/08/00												
19/08/00												
au	Floraison	13	21	11	15	21	16	6	8	10	3	36
01/09/00												
01/09/00												
au	Grain pâteux	25	46	17	21	26	25	17	27	17	17	4
10/10/00												
10/10/00												
au	Maturité	1	2	1	5	34	5	26	5	2	3	0
23/10/00												

* d'après Blondel (1971a)

Tableau 5c : Offre en N du sol et demande en N du maïs variété SR21, champs de case.

Dates	Période physiologique cycle de 120 j	Offre en N du sol (kg ha ⁻¹)																Demande N de la plante * cycle de 90 j (kg ha ⁻¹)
		site 1		site 4		site 6		site 9		site 10		site 12		site 13		site 15		
		0N	80N	0N	80N	0N	80N	0N	80N	0N	80N	0N	80N	0N	80N	0N	80N	
18/06/00 28/06/00 au 19/08/00 19/08/00 au 01/09/00 01/09/00 au 10/10/00 10/10/00 au 23/10/00	Semis	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Montaison	48	85	94	69	23	73	63	108	10	29	28	65	47	124	36	98	67
	Floraison	10	13	14	26	20	22	22	27	20	11	22	29	24	28	16	34	36
	Grain pâteux	16	21	30	40	34	54	41	94	33	24	49	40	36	38	27	28	4
	Maturité	0	5	0	2	0	11	1	32	11	7	13	1	6	1	1	1	0

* d'après Blondel (1971a)

4 - Chapitre 4 : FOURNITURE DE L'AZOTE A LA PLANTE	58
4.1 – Introduction	58
4.2 - Disponibilité et utilisation de N provenant du sol et de l'engrais	58
4.2.1 - Matériel et méthodes	58
4.2.2 – Résultats	59
4.2.3 – Discussion	60
4.2.4 – Conclusion	62
4.3 - Disponibilité et utilisation de N provenant du sol et de la fixation de N₂	62
4.3.1 - Matériel et méthodes	63
4.3.2 - Résultats et discussion	63
4.4 - Recherche d'indicateurs de N sol et N engrais absorbé par la plante	66
4.4.1 - Matériel et méthodes	66
4.4.2 – Résultats	68
4.4.3 - Discussion conclusion	75

4 - Chapitre 4 : FOURNITURE DE L'AZOTE A LA PLANTE

4.1 - Introduction

L'engrais azoté est un des facteurs de production agricole majeurs dont l'utilisation est en hausse en Afrique de l'ouest et notamment au Burkina Faso. Malheureusement, du fait de pratiques de fertilisation inadaptées, son efficacité est réduite et les pertes sont importantes. Confrontée à ce problème, afin d'optimiser la gestion de l'azote, la Recherche développe depuis les années 50 des outils de mesure mais aussi propose des solutions techniques adaptées aux différents contextes agro-socio-économiques. A l'instar des pays tempérés, en Afrique de l'Ouest, on distingue deux grandes étapes correspondant à deux approches méthodologiques. La première, classique et depuis longtemps mise en œuvre, porte sur la mesure de la productivité de l'unité de N engrais et la recherche de la dose optimum basée sur l'établissement des courbes de réponse à l'engrais (Pieri et al., 1978 ; Mughogho, 1985); la deuxième qui bénéficie des techniques isotopiques vise le synchronisme offre-demande : elle consiste à évaluer la demande en N de la plante pour un objectif de rendement donné, et la fourniture de N par la minéralisation nette dans le sol (et par la fixation de N_2 pour une légumineuse) (Blondel, 1971 ; Janssen et al., 1990). Cette deuxième approche est mise en œuvre dans la présente étude aux chapitres 3 et 4. La minéralisation nette a été estimée au chapitre précédent. Le présent chapitre est consacré à la quantification de N total de la plante dérivé de l'engrais (NdfF), dérivé du sol (NdfS) et en plus dans le cas du niébé, dérivé de la fixation de N_2 (NdfFix), et par la recherche de leur déterminisme. Pour quantifier NdfF, NdfS et NdfFix, la méthode isotopique (^{15}N) est utilisée. Notons qu'au Burkina Faso en dehors de Sedogo (1993) qui a mesuré NdfF et NdfS, aucune quantification de NdfFix n'a été opérée jusqu'à présent. On sait que ces variables sont influencées par le pool N minéralisable du sol (Legg et Meisinger, 1982 ; Mughogho et al., 1985 ; Myers, 1987) d'où l'accent mis dans notre étude sur les variables Nd (pool N minéralisable), Nav (N minéralisable à court terme) et $N-NO_3^-$ (nitrates) et sur la recherche d'indicateurs qui fait l'objet du paragraphe 4.4.

4.2 - Disponibilité et utilisation de N provenant du sol et de l'engrais

4.2.1 - Matériel et méthodes

L'étude est conduite sur les parcelles de l'essai « longue durée » de Saria, décrit au chapitre 2. Les parcelles utilisées sont celles des traitements fm et fmo de la série a (monoculture de sorgho) des répétitions 2, 3, 4 et 5 (annexes 1a et 5). La variété de sorgho utilisée est la

SARIASO 10 dont les principales caractéristiques sont indiquées en annexe 4. Les traitements appliqués sont :

fm : 60 kg N ha⁻¹ + fumure minérale PK (PK = 23 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 14 kg K₂O ha⁻¹)

fmo : 60 kg N ha⁻¹ + fumure minérale PK + 5 t MS ha⁻¹ (fumier)

Le fumier est apporté 1 fois tous les 2 ans.

N est apporté sous forme d'urée, P sous forme de super triple phosphate, et K sous forme de chlorure de potassium. La détermination du CRU, du NdfF et de NdfS est faite selon la méthode développée au chapitre 2.

4.2.2 - Résultats

- Coefficient réel d'utilisation de N engrais (CRU %), azote de la plante dérivé de l'engrais (NdfF en % et en kg ha⁻¹) et du sol (NdfS en % et en kg ha⁻¹).

Les résultats sont présentés à l'annexe 6 et dans le tableau 6 suivant :

Tableau 6 : Quantité et pourcentage de N engrais et de N sol dans la plante

Traitements	MS kg ha ⁻¹	Ntot plante kg ha ⁻¹	NdfF		NdfS		CRU %	Valeur A kg N ha ⁻¹
			%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹		
fm	6462	49.2	41.51	20.3	58.49	28.9	34.1	85.7
fmo	4641	43.9	38.12	16.0	61.88	27.8	27.0	104.0
ppds (5%)	1801	17.8	11.48	4.1	11.48	16.3	6.9	
C.V. %	18.8	19.3	12.8	10.0	8.5	25.6	10.0	
Signification (5%)	S	NS	NS	S	NS	NS	S	

S : significatif (p < 0.05)

NS : Non significatif (p > 0.05)

Le NdfF % est de l'ordre de 40 % sans effet de fumier. En revanche le fumier diminue significativement le NdfF (kg ha⁻¹) et le CRU % qui passe de 34 à 27 %. Le NdfS % est de l'ordre de 60 % sans effet significatif du fumier.

- N immobilisé dans le sol 0-80 cm

Le N immobilisé est mesuré dans chacun des horizons 0 - 20, 20 - 30, 30 - 50 et 50 - 80 cm, et désigné par Nis % dans l'horizon 0 - 20 cm et par NiS % dans l'horizon 0 - 80 cm. Les résultats sont présentés à l'annexe 7 et synthétisés à la figure 13. Le NiS % est de l'ordre de 35 % sans effet significatif de fumier (35 et 36 % respectivement pour fm et fmo). Le Nis % représente 71 % et 61 % du NiS % respectivement pour le traitement sans fumier (fm) et celui avec fumier (fmo).

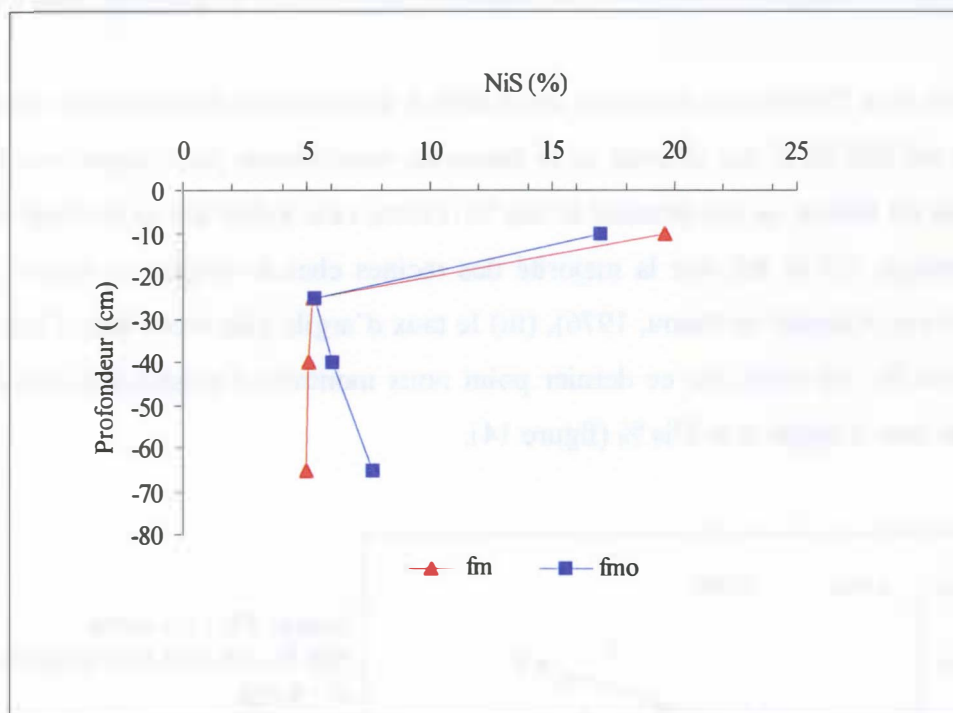


Figure 13 : Pourcentage de N urée ^{15}N retrouvé dans le sol après culture par horizon.

4.2.3 - Discussion

Le NdfS % est supérieur au NdfF %, ce qui atteste que le pool de N minéralisable du sol (Nd) est une variable majeure du rendement du sorgho. L'hypothèse avancée pour expliquer NdfS % > NdfF % se rapporte à l'indice d'efficacité de l'azote. L'indice d'efficacité de l'azote est le rapport entre la quantité de grains produite et la quantité d'azote absorbée dans les parties aériennes de la plante ; il définit donc la quantité de grains produite par unité d'azote absorbée par la culture. En effet, les céréales ayant un faible indice d'efficacité de l'azote, compris entre 23 et 30 comme le mil et le sorgho, même en fumure azotée optimale, présentent un NdfS % supérieur au NdfF %, cela ayant été expérimentalement vérifié à maintes reprises et notamment par Gigou (1982), Ganry (1990) et Sedogo (1993). Ce type de culture exige plus d'azote pour produire une même quantité de grains que celui ayant un indice supérieur (maïs par exemple avec un indice > 40) et ce « plus » est pris au sol et non à l'engrais (Blondel, 1971 ; Ganry, 1990).

Le NiS % est relativement élevé (35 % dont les $\frac{2}{3}$ environ pour le seul horizon de surface) par rapport au CRU % qui ne dépasse pas 35 %. Cela confirme les résultats obtenus par Gigou (1982) sur sorgho au Nord Cameroun qui trouve $40 < \text{NiS \%} < 50$ sur 0 – 40 cm pour une dose d'urée de 100 kg N ha^{-1} , par Ganry (1990) sur mil au Sénégal et par Sedogo (1993) sur sorgho au Burkina Faso.

Paradoxalement, le fumier (5 t MS ha^{-1} tous les 2 ans) est sans effet significatif sur le NiS. L'hypothèse avancée est celle de pertes accrues sous l'effet du fumier (hypothèse en accord

avec les résultats du chapitre 5 montrant une augmentation des pertes globales sous l'effet du fumier).

Le Nis % élevé dans l'horizon 0-20 cm est attribuable à trois causes : (i) une teneur en matière organique du sol (MOS) et une activité de la biomasse microbienne plus importante dans cet horizon du fait du labour, ce qui favorise le Nis % comme cela a déjà été montré par Badiane (1993) au Sénégal, (ii) le fait que la majorité des racines chez le sorgho se trouve dans la couche 0 – 25 cm (Chopart et Nicou, 1976), (iii) le taux d'argile plus élevé dans l'horizon de surface (annexe 8) ; en effet, sur ce dernier point nous montrons l'existence d'une relation étroite entre le taux d'argile et le Nis % (figure 14).

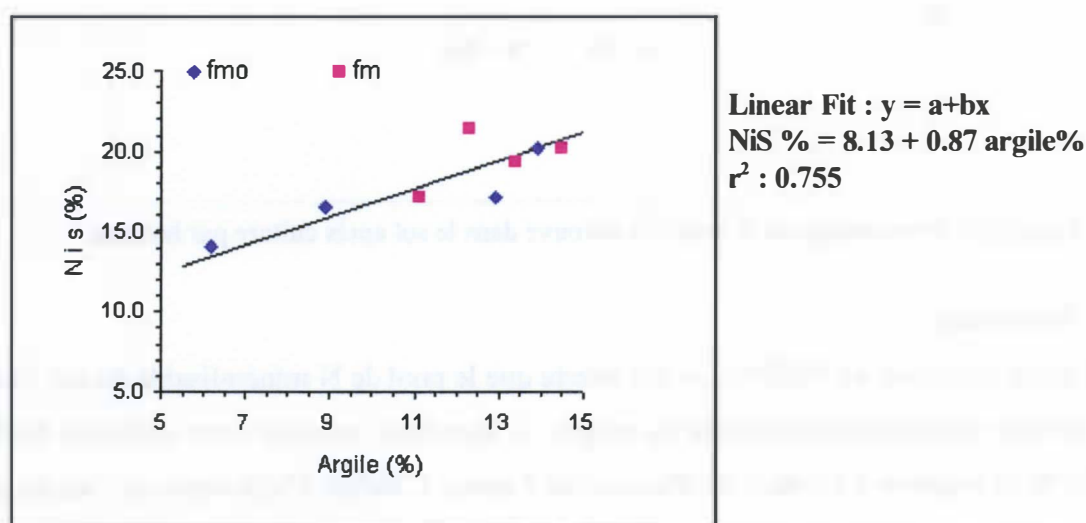


Figure 14 : Relation entre le taux d'argile et le Nis % (horizon 0 – 20 cm)

On sait que l'azote immobilisé dans le sol, sous forme de corps microbiens, est relativement stable. Gigou (1982) au Nord Cameroun sur sorgho a mesuré les arrière-effets du Nis 2 années de suite : il trouve un Nis % sur 0 – 40 cm de 40, 25 et 20 % la première, deuxième et troisième année. Cet azote, parce qu'immobilisé dans l'horizon qui contient la majorité du système racinaire, est récupérable en partie par les cultures suivantes ; c'est la raison pour laquelle certains auteurs ont défini l'efficacité de l'engrais par CRU % + Nis % (Ganry et Badiane, 1991).

Les pertes globales de N engrais (^{15}N non retrouvé analytiquement dans la plante et non immobilisé dans l'horizon 0 – 80 cm) sont d'environ 37 % (annexe 8). Ces pertes sont élevées et dues vraisemblablement à la volatilisation à partir de l'urée et/ou la dénitrification. L'hypothèse volatilisation est confirmée par les résultats du chapitre 7 qui montrent une importante volatilisation de N après un apport d'urée. Les pertes par dénitrification sont potentiellement élevées si les conditions de la dénitrification sont réunies : hydromorphie,

présence de nitrates et source de MOS facilement métabolisable (voir chapitre 8). Les pertes par lixiviation sont généralement considérées comme négligeables ou nulles (Cissé et Vachaud, 1988) ; cette hypothèse est en accord avec les résultats du chapitre 7 montrant une faible lixiviation de ^{15}N dans les solutions de tensionics. Les pertes par ruissellement et par érosion sont considérés comme nulles (très faible pente).

4.2.4 - Conclusion

L'azote de l'urée apportée est fortement immobilisé, surtout dans l'horizon de surface, et l'argile est un facteur favorable positif de cette immobilisation. Malheureusement ce facteur n'est pas « manipulable ». Le fumier n'a pas d'effet sur le NiS %. Les pertes globales de N sont importantes et sont certainement responsables de la faible utilisation de l'engrais par les cultures. C'est donc en réduisant ces pertes que l'on pourra améliorer le CRU %.

4.3 - Disponibilité et utilisation de N provenant du sol et de la fixation de N_2

Introduction

L'apport d'azote par les légumineuses (au sens d'un input d'azote dans le système sols-plante) est fortement influencé par les conditions environnementales et secondairement par le facteur variétal, ce qui a été clairement montré par Wetslaar et Ganry (1982) pour l'arachide et le soja et aussi pour les arbres par Gibson et al. (1982). Par exemple, ce dernier auteur montre que dans les conditions favorables, *Leucoena leucocephala* fixe jusqu'à $500 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, mais en conditions défavorables, cette fixation descend à 13 % de celle-ci.

Le niébé est la légumineuse par excellence des systèmes cultureux africains (en associations, en rotations ou en culture relais) et est actuellement la culture la plus répandue au Burkina Faso. En zone semi-aride, ce succès est dû essentiellement à ses qualités alimentaires mais aussi à ses capacités « améliorantes » de la fertilité des sols. De nombreuses études ont été réalisées dans le monde sur la quantification de la fixation de N_2 des légumineuses mais à notre connaissance aucune, *in situ*, sur le niébé. La présente étude porte sur la quantification de la fixation symbiotique de N_2 par le niébé (NdfFix) dans un système de rotation biennale sorgho-niébé sur un sol ferrugineux tropical lessivé, en station.

Pour que la légumineuse présente une capacité « améliorante », deux conditions doivent être réalisées : NdfFix doit être supérieur à N_{tot} plante (condition nécessaire), et la fixation de N_2 doit accroître le pool N minéralisable une fois la relation (1) assurée.

4.3.1 – Matériel et méthodes

Le matériel végétal

Deux types de cultures sont réalisés :

1 - Le Niébé : variété K VX414-22-2.

Cette variété est issue d'une sélection locale et destinée à la zone centre du Burkina Faso. Ses caractéristiques sont indiquées en annexe 4.

2 - Le Mil : variété IKMP5

Cette variété retenue comme plante de référence non nodulante dans cette étude, provient aussi d'une sélection locale pour la zone de l'étude. Ses caractéristiques agronomiques sont indiquées en annexe 4. Cette variété répond aux critères de choix de la plante de référence (longueur du cycle, enracinement et rythme d'absorption de N) pour l'application de la méthode de la valeur A (AIEA, 1990).

Les apports de N engrais et la fertilisation P et K

L'engrais azoté utilisé est l'urée ^{15}N marqué à 5 % pour le niébé et à 1 % pour le mil, à des doses respectivement de 20 kg N ha^{-1} et 100 kg N ha^{-1} .

Le P et le K sont apportés à raison de $23 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ (super triple phosphate) et de $14 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ (chlorure de potasse) pour les 2 cultures.

Le dispositif de l'étude

Le Niébé et le Mil sont cultivés simultanément sur les parcelles de l'essai « longue durée » de Saria décrit au chapitre 2. Sur ce dispositif, seules les parcelles en rotation biennale sorgho-niébé des traitements fm et fmo sont utilisées pour cette étude. Chaque parcelle des répétitions 2, 3, 4 et 5 est divisée en deux parties dont l'une pour le mil et l'autre pour le niébé (annexe 10).

Méthode utilisée

La méthode utilisée est celle de la Valeur A décrite au paragraphe 2.1.2. Rappelons qu'il s'agit d'une méthode de mesure indirecte de la fixation de N_2 fondée sur l'utilisation d'une plante de référence.

4.3.2 - Résultats et discussion

Les résultats sont synthétisés dans le tableau 7 ci-après. L'ensemble des résultats est présenté en annexes 11, 11₁ et 11₂

Tableau 7 : NdfFix (% et kg ha⁻¹) dans le niébé (matière sèche aérienne, MS)

Traitements	MS	Ntot plante		NdfF		Valeur A			NdfFix	
	(niébé) kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	sol+fix (niébé) kg ha ⁻¹	sol (mil) kg ha ⁻¹	fixation kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹
fm	2433.9	1.18	28.81	5.65	1.63	376.8	235.7	141.1	40.28	11.60
fmo	3015.6	2.36	71.09	4.42	3.37	420.7	248.1	172.5	38.54	27.40
p.p.d.s. (5%)	316.3	1.02	30.16	5.02	1.94	242.5	58.04	193.9	29.25	24.34
C.V %	9.6	18.9	20.6	18.7	25.7	9.7	19.6	18.6	18	27.9
Signification	HS	S	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

E % engrais : 5,22

NF (niébé) = 19,8 kg ha⁻¹

NF (mil) = 99 kg ha⁻¹

HS : hautement significatif (p < 0.01)

S : significatif (p < 0.05)

NS : Non significatif (p > 0.05)

Le fumier exerce un effet positif et significatif sur les rendements des parties aériennes exprimé en MS et sur le Ntotal plante qui passe de 29 à 71 kg N ha⁻¹. En revanche, il est sans effet sur le NdfFix % qui est d'environ 40 % et le NdfFix (kg ha⁻¹) qui ne dépasse pas 28 kg ha⁻¹. Ces NdfFix sont faibles par rapport à ceux obtenues par d'autres auteurs dont Ganry (1991) sur l'arachide au Sénégal avec des valeurs de 60 à 80 %, Kwakye et Ofori (1977) toujours sur l'arachide au Ghana qui atteignent 70 %. De récents travaux au Bénin réalisés par Houngnandan et al. (2000) et Vanlauwe et al. (2001) ont abouti à des NdfFix du niébé en culture pure de 23 à 68 % sur un Nitisol et de 27 à 70 % sur un Luvisol. Les résultats obtenus en zone tempérée sont supérieurs à ceux des tropiques, plus de 80 % de NdfFix pour le pois et le soja en France (Amarger, communication personnelle).

La fixation potentielle de N₂ (FPN) d'une légumineuse, et du niébé en particulier, est liée à la variété (Ndiaye et al., 2000). La FPN est souvent limitée par les contraintes du milieu, la fixation réelle de N₂ alors mesurée (FRN) n'est pas à son maximum. Les principales contraintes empêchant la FPN de s'exprimer sont dans l'ordre décroissant :

- (1) les contraintes hydriques (ETR, ETR/ETM et enracinement) ;
- (2) les contraintes chimiques (pH, P, N minéral) ;
- (3) les contraintes biologiques : trois cas de figures peuvent se présenter :
 - (i) les sols n'ont pas de rhizobium spécifiques (sans objet pour le niébé qui, comme l'arachide, nodule à partir des souches de rhizobiums Cowpea largement représentées dans le sol) ;

- (ii) les sols sont défavorables à la fixation de N_2 , bien que possédant des rhizobiums (présence de nématodes par exemple) ;
- (iii) les sols sont pourvus en rhizobiums mais on veut accroître la fixation de N_2 (on veut tendre vers la FPN).

Nous allons examiner l'importance de chacune de ces contraintes dans le cas de la culture du niébé en objet.

Les contraintes hydriques. Depuis Sprent (1972 et 1976), on sait que la fixation de N_2 est très sensible à l'alimentation hydrique de la culture. Sur arachide, des études réalisées au Sénégal ont clairement montré l'effet dépressif de la sécheresse sur la fixation de N_2 (Wey et Obaton, 1978 ; Meyer et al., 1982). Pour une même longueur de cycle et dans des conditions écologiques identiques, nous formulons l'hypothèse d'une évolution similaire de la fixation de N_2 en cours de cycle chez l'arachide et chez le niébé. Voici ce qu'ont observé Wey et Obaton (1978) sur arachide : « après une latence d'une quinzaine de jours (installation de la nodulation), la fixation croît très rapidement pour atteindre un maximum d'activité entre le quarante-cinquième et le cinquante-cinquième jour du cycle (répondant bien à l'évolution des besoins azotés de la plante) ; au delà de ce niveau maximum, la fixation décroît progressivement pour ralentir, voire s'arrêter dès le soixante-quinzième jour du cycle, correspondant au jaunissement des feuilles (maturation) ». Un déficit hydrique durant cette période inhibe la fixation de N_2 . Dans notre expérimentation, la répartition des pluies durant le cycle cultural montre trois déficits hydriques capables effectivement d'inhiber la fixation de N_2 (figure 3) : pendant la croissance végétative (24 au 31 juillet), pendant la période de floraison (15 au 22 août) et, dans une moindre mesure, juste avant la fin de la maturation (à partir du 26 septembre). Ces déficits sont intervenus pendant la période de fixation de N_2 maximum, surtout pendant la floraison où l'activité fixatrice est la plus sollicitée. En zone soudano-sahélienne, la fréquence de ces déficits est grande (presque tous les ans) (Dancette, 1979 ; Barro, 1999) et les plantes à enracinement profond résistent mieux à la sécheresse.

Les contraintes chimiques. Les sols étudiés sont faiblement acides (annexe 9), pauvres en N minéral en dehors du pic de minéralisation intervenu en début de saison des pluies (confirmé par les résultats du chapitre 3 sur la minéralisation de N dans les sols), et en P (la carence en P est corrigé par l'apport de phosphate). Cette contrainte est alors peu vraisemblable.

Les contraintes biologiques. Le Ndffix de 40 % est faible malgré la capacité du niébé de noduler à partir des souches de rhizobiums Cowpea largement représentées dans le milieu ; la contrainte rhizobiologique est peu probable mais n'est pas à écarter en raison notamment d'un possible effet défavorable des nématodes sur la symbiose rhizobium-légumineuse (Meyer et al., 1982).

La relation $N_{dfFix} > N_{tot\ plante}$ est la première condition à satisfaire pour que la légumineuse enrichisse le sol en azote. Cette relation n'est pas vérifiée ici. Même en ajoutant le N_{dfFix} de la biomasse racinaire au N_{dfFix} des parties aériennes, sur la base d'une hypothèse « optimiste » de $N_{dfFix\ racines} = 30\ \% N_{dfFix\ parties\ aériennes}$, on obtient toujours $N_{dfFix} (racines + parties\ aériennes) < N_{tot\ plante}$; on peut alors conclure que ce niébé dans les conditions de cet essai n'enrichit pas le sol en N.

4.4 - Recherche d'indicateurs de N sol et N engrais absorbé par la plante

Introduction

De nombreux travaux ont été conduits sur la quantification des variables N_{dfS} et N_{dfF} en station, mais peu en milieu paysan. Parce que leur mesure est difficile et coûteuse (eu égard à la technique isotopique), la recherche d'indicateurs de prévision est nécessaire. Une première approximation de N_{dfS} , et par voie de conséquence de N_{dfF} , pourrait consister en la mesure du N total de la plante témoin sans engrais azoté (désigné par $N_{tot\ plante T_0}$) ; mais en raison de la grande différence souvent mesurée entre N_{dfS} et $N_{tot\ plante T_0}$ en zone tropicale ($N_{dfS} > N_{tot\ plante T_0}$) (Legg et Allison, 1960 ; Ganry et Guiraud, 1979), cet indicateur n'est pas valide. En revanche, Palma-Lopez (1994) a montré, pour le maïs, l'existence d'une relation étroite entre N_{dfS} et $N_{tot\ plante T_0}$ ($r^2 = 0,88$). Ce résultat nous a incité à poursuivre dans ce sens la recherche d'indicateurs facilement mesurables, ce qui constitue l'objectif de cette étude. Cette recherche d'indicateur est fondée sur la technique ^{15}N et sur une analyse statistique prenant en compte la variabilité spatiale en milieu paysan. La recherche d'indicateurs de N_{dfFix} n'a pas été conduite ici.

4.4.1 - Matériel et méthodes

Les 24 sites expérimentaux sont répartis sur le terroir de Thiougou (carte 4). Les principaux critères de choix de ces champs sont : (1) l'accessibilité afin de permettre un suivi rigoureux, (2) le type de sol : les essais sont situés sur des sols ferrugineux tropicaux lessivés (CPCS, 1967 ; Guillobez, 1985) ou Luvisols (FAO, 1991) qui occupent la majeure partie du terroir, (3) la toposéquence : les sites sont soit en haut de pente soit à mi-pente, (4) la position géographique par rapport au village qui permet de prendre en compte la variabilité spatiale des sites.

Les essais sont conduits en maïs, variété SR21 (annexe 4) sélectionnée pour cette zone agroclimatique et vulgarisée dans le terroir de Thiougou. Chaque essai comprend 2 traitements : T_0 qui reçoit une fertilisation N P K, respectivement de 0, 35 kg $P_2O_5\ ha^{-1}$, 58 kg

$K_2O\ ha^{-1}$ et T_1 qui reçoit une fertilisation N P K respectivement de $80\ kg\ N\ ha^{-1}$, $35\ kg\ P_2O_5\ ha^{-1}$ et $58\ kg\ K_2O\ ha^{-1}$, avec 2 répétitions par essai. N est apporté sous forme d'urée marqué ^{15}N , P sous forme de phosphate super triple (46 % P_2O_5) et K sous forme de chlorure de potassium (60 % K_2O). Le dispositif parcellaire est présenté en annexe 2. Des informations sur le passé cultural, les modes de gestions de la fertilité des sols passés et actuels et sur les types de champs et leur position topographique, sont obtenues par enquête pour chaque site.

Deux échantillons de plante sont constitués à partir des parties aériennes récoltées sur la parcelle utile de $2\ m \times 3.2\ m$ de chaque essai (annexe 2) : les graines d'une part et les pailles (tiges + feuilles + rachis + spathes) d'autre part. Chaque échantillon est constitué de l'ensemble des grains ou des pailles, récolté sur toute la parcelle utile ^{15}N . Ces récoltes sont finement broyées échantillon par échantillon et envoyées au laboratoire pour les dosages.

Chaque échantillon de sol analysé résulte d'un mélange de 5 prélèvements réalisés dans le même site. Les sols sont prélevés dans l'horizon 0-20 cm, juste avant la mise en place des essais.

Les déterminations isotopiques ainsi que les analyses de sol sont faites dans différents laboratoires spécialisés. Ces laboratoires ainsi que les méthodes sont présentés au chapitre 2.

Rappel sur les variables utilisées :

. N total de la plante : $N_{tot\ plante}\ (kg\ N\ ha^{-1}) = N\ \% \ (grains\ et\ paille) \times MS\ (matière\ sèche\ total)$. $N_{tot\ plante}$ du traitement sans apport de N engrais est désigné par $N_{tot\ plante}T_0$

. N minéralisable : $N_{av}\ (mg\ kg^{-1}) = N-NO_3^- + N_{av-net}$ (N minéralisable après incubation)

Pour les autres variables, les définitions sont celles données par l'AIEA (IAEA, 1990) : CAU %, $N_{dff}\ (\% \text{ et en } kg\ ha^{-1})$, $N_{dfs}\ (\% \text{ et en } kg\ ha^{-1})$. Les formules utilisées pour le calcul de ces variables sont celles définies au paragraphe 21.

Pour les cultures non fertilisées (ON), notons que $N_{dfs} = N_{tot\ plante}T_0$.

Une analyse en composantes principales a été faite avec le logiciel XLSTAT sous Excel (Fahmy, 1995) sur les données de sol peu corrélées entre elles (argile, sable, pH, P assimilable, Ca, Mg, K et CEC) et en écartant les variables indicatrices de la fertilité azotée. Les régressions multiples ont été calculées avec le logiciel SPSS (Statistical Package for Social Sciences) (Spss.com/, version 9) en mode « Stepwise multiple regression » avec comme variables dépendantes le N_{dff} et le N_{dfs} (en % et en $kg\ ha^{-1}$), et comme variables explicatives les caractéristiques physico-chimiques du sol, le $N_{tot\ plante}T_0$ et le CAU %. Ce mode de calcul des régressions multiples permet d'établir la relation significative entre une variable que l'on veut expliquer (variables dépendante) et des variables susceptibles de pouvoir l'expliquer (variables explicatives ou indépendantes). Le modèle est alors construit « pas à pas » et seules les variables qui contribuent significativement sont retenues dans

l'équations finale (les autres sont alors rejetées). Les variables explicatives ne doivent pas être inter-dépendantes. Pour les cultures non fertilisées (0N), rappelons que $NdfS = N_{tot} \text{ plante } T_0$.

4.4.2 – Résultats

4.4.2.1 - Variabilité spatiale de la fertilité du sol

Le tableau 8 représente les caractéristiques physico-chimiques essentielles du sol de l'ensemble des sites d'étude (l'annexe 12₁ regroupe l'ensembles des données d'analyses de ces sols).

L'analyse en composantes principales réalisée sur ces données (figures 15a et 15b) fait apparaître trois groupes de sol distincts différents par leur niveau de fertilité (tableau 9).

Le groupe 1 se compose de 7 sites dont les références sont : 2, 7, 9, 16, 18, 20 et 24 et correspond aux sols fertiles. Le groupe 2 se compose de 7 sites dont les références sont : 3, 5, 6, 14, 17, 19 et 22 et correspond aux sols très peu fertiles. Le groupe 3 se compose de 10 sites dont les références sont : 1, 4, 8, 10, 11, 12, 13, 23, 25 et 26 et correspond aux sols peu fertiles. Qu'elle est la représentation géographique de ces groupes ? La première approche qui s'impose naturellement est de confronter ces groupes avec la répartition des champs de culture qu'on observe classiquement en Afrique de l'Ouest, à savoir : les champs de case, les champs de brousse et les champs intermédiaires, fonction de la distance à l'exploitation. On observe effectivement la correspondance suivante : (i) le groupe sols fertiles correspond aux champs proches des habitations qui reçoivent une fertilisation forte non maîtrisée (matière organique, engrais) ; (ii) le groupe des sols très peu fertiles correspond aux champs situés en brousse, éloignés des habitations, ils sont généralement non fertilisés mais bénéficient quelque fois de jachères de courte durée (1 à 2 ans) ; leurs résidus cultureux sont totalement exportés ; (iii) le groupe des sols peu fertiles correspond aux champs intermédiaires situés entre les habitations et la brousse (généralement éloignés des habitations de leur propriétaire) qui reçoivent une faible fertilisation minérale et organique.

Les enquêtes sur les précédents cultureux des 5 dernières années ont montré que : (i) dans les sites du groupe 1, ce sont essentiellement des successions de céréales de base, maïs, sorgho (sorgho rouge) et association sorgho/mil ; (ii) dans les sites du groupe 2, ce sont essentiellement des associations de céréales sorgho/mil et de légumineuses à graines (arachides, niébé) ; (iii) dans les sites du groupe 3, il s'agit de cultures continues de mil, ou de sorgho rouge.

La position du champ sur la toposéquence n'affecte pas la détermination des groupes de fertilité.

Tableau 8 : Caractéristiques physico-chimiques des sols des 24 sites à Thiougou

Site	Type de champs	Granulométrie					CEC et bases échangeables (cmol(+) kg ⁻¹)					Pass mg kg ⁻¹	pH H ₂ O
		Arg %	Limon %	sable %	C org. %	N total mg kg ⁻¹	Ca éch	Mg exch	K exch	Na exch	CEC		
1	ci	5.2	20.0	74.8	0.52	490	2.60	0.65	0.33	0.02	3.47	193	6.90
2	cc	13.1	16.8	70.0	0.43	310	3.68	0.92	0.31	0.03	5.60	662	7.15
3	cb	7.9	12.1	80.0	0.39	290	1.41	0.46	0.08	0.02	1.99	76	5.95
4	ci	1.8	18.7	79.5	0.26	220	1.36	0.35	0.27	0.01	1.93	112	7.85
5	cb	8.5	18.8	72.6	0.40	290	1.58	0.46	0.10	0.01	2.24	53	6.15
6	cb	8.5	25.6	65.9	0.40	260	1.22	0.37	0.06	0.00	1.82	67	6.35
7	cc	10.1	23.9	66.0	0.67	540	3.62	0.80	0.30	0.02	5.06	142	6.95
8	ci	3.6	20.0	76.3	0.34	240	1.88	0.52	0.19	0.01	2.54	97	6.75
9	cc	7.5	19.2	73.4	0.64	540	3.06	0.78	0.32	0.03	4.65	171	6.80
10	cc	5.8	15.3	78.8	0.31	260	1.72	0.60	0.11	0.01	2.40	102	6.85
11	ci	7.4	18.8	73.7	0.30	250	1.75	0.51	0.22	0.04	2.87	67	6.40
12	ci	3.9	17.0	79.0	0.37	280	2.48	0.46	0.21	0.01	3.63	105	7.00
13	ci	10.8	22.6	66.6	0.44	380	2.77	0.46	0.21	0.01	3.65	154	7.50
14	cb	6.1	23.4	70.5	0.38	240	1.76	0.47	0.08	0.02	2.76	49	6.15
16	cc	4.9	20.9	74.2	0.41	370	2.97	0.66	0.66	0.03	4.33	351	7.80
17	cb	4.2	11.8	84.0	0.26	170	0.97	0.32	0.06	0.01	1.39	58	6.35
18	cc	6.2	19.7	74.1	0.52	370	4.56	0.43	0.24	0.02	5.26	762	8.15
19	cb	5.5	14.4	80.3	0.31	210	1.28	0.46	0.08	0.01	2.15	61	6.55
20	cc	9.7	13.9	76.5	0.60	410	4.69	0.59	0.22	0.02	4.82	585	8.25
22	cc	4.3	20.8	74.9	0.36	260	1.93	0.54	0.08	0.00	2.57	67	6.00
23	ci	8.3	24.3	67.5	0.33	280	2.07	0.53	0.11	0.03	3.23	54	6.60
24	cc	10.7	21.1	68.2	0.77	630	5.61	0.82	0.43	0.03	7.06	427	8.00
25	cc	2.5	16.2	81.0	0.19	150	1.01	0.23	0.11	0.02	1.23	75	6.50
26	ci	2.9	15.6	81.5	0.51	420	1.59	0.41	0.29	0.02	2.19	107	6.35

* cc = champ de case

cb =champs de brousse

ci = ch. intermédiaires

Tableau 9 : Caractéristiques physico-chimiques initiales des sols par groupe de fertilité et type de champ

Groupe	Niveau de fertilité	Type champ	Arg %	Sable %	C org. %	C/N	Ca éch cmol(+) kg ⁻¹	Mg éch cmol(+) kg ⁻¹	K éch cmol(+) kg ⁻¹	CEC cmol(+) kg ⁻¹	Pass. mg kg ⁻¹	pH H ₂ O
1	fertile	cc	8.89	43.03	0.58	12.86	4.03	0.71	0.35	5.25	442.9	7.59
2	très peu fertile	cb	6.43	51.31	0.36	14.67	1.45	0.44	0.08	2.13	61.6	6.21
3	peu fertile	ci	5.22	45.88	0.36	12.2	1.92	0.47	0.21	2.71	106.6	6.87

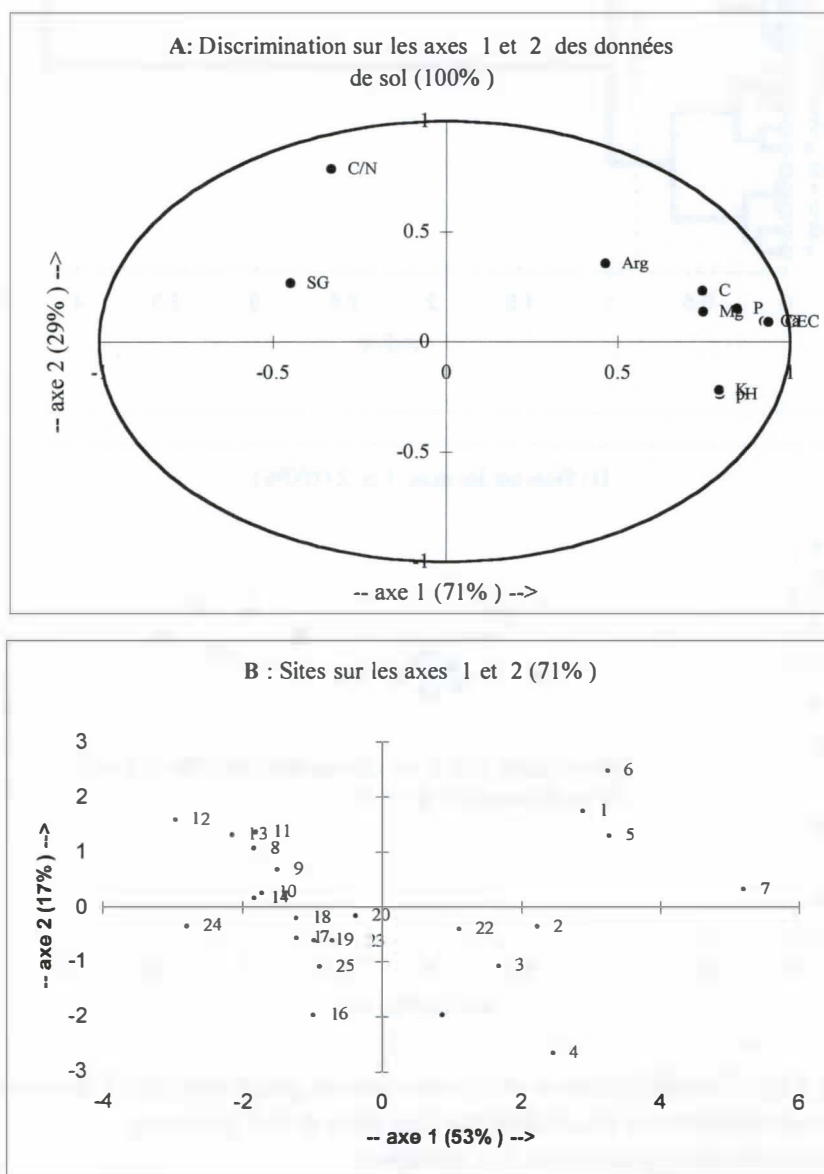


Figure 15a : Graphiques de discrimination des sites :

A = répartition des données de sol de chaque site selon les 2 axes principaux ;

B = répartition des sites selon les 2 axes principaux.

Tests de l'hypothèse d'égalité des vecteurs espérances des 3 groupes :

1: test de Wilks : la probabilité de se tromper en rejetant l'hypothèse d'égalité des barycentres des groupes vaut : 0.0001

2: test de Hotelling-Lawley : la probabilité de se tromper en rejetant l'hypothèse d'égalité des barycentres des groupes vaut : 0.9805

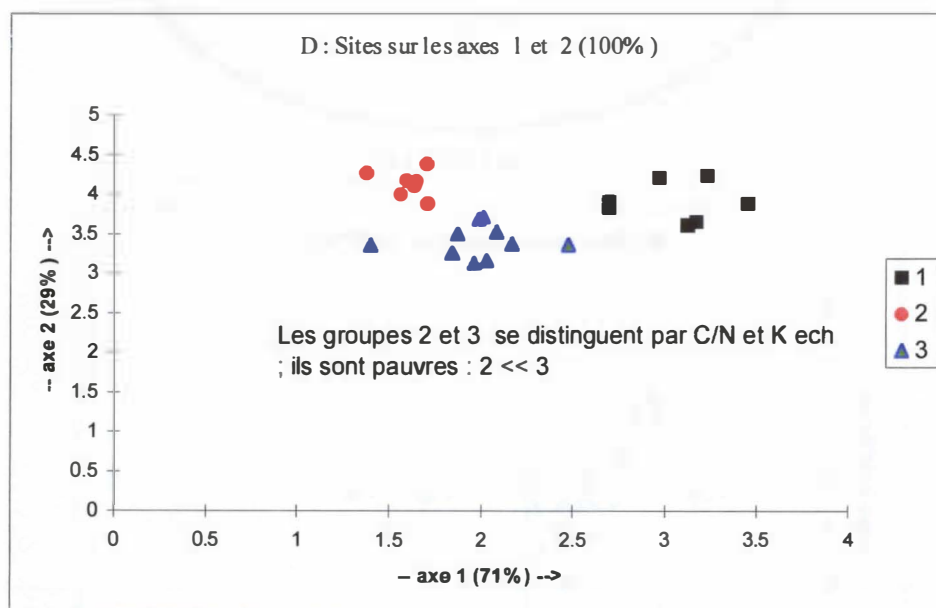
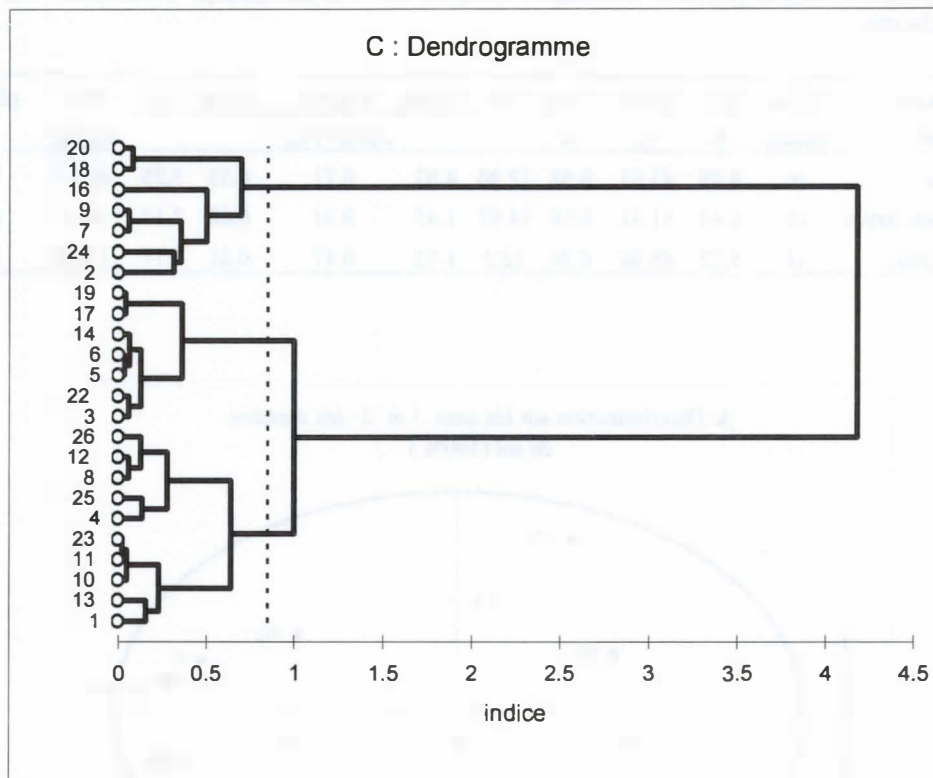


Figure 15b : Dendrogramme et représentation graphique des 3 groupes :
 C = dendrogramme d'identification des sites et des groupes,
 D = représentation graphique des groupes.

4.4.2.2 – Variabilité spatiale du N total plante (Ntot plante), du CAU %, du N derived from fertilizer (NdfF) et du N derived from soil (NdfS).

Les résultats par groupe de fertilité figurent au tableau 10 (les données globales sont en annexes 12₂, 12₃).

En moyenne, le Ntot plante varie de 56 à 102 kg N ha⁻¹, le NdfS de 40 à 73 % dans le sens d'une augmentation des champs de brousse pauvres vers les champs de cases fertiles. Par contre la variabilité spatiale du CAU% (23 à 38 %) et du NdfF (24 à 53 %) diminue des champs de brousse vers les champs de case.

4.4.2.3 – Détermination d'indicateurs facilement mesurables du rendement azote de la plante sans engrais (Ntot planteT₀), du NdfF et du NdfS.

- Relations entre variables dépendantes (Ntot planteT₀, NdfF et NdfS) et variables indépendantes (Ntot planteT₀, CAU% et caractéristiques du sol) sans distinction de groupes de fertilité.

Le tableau 11 fait apparaître les régressions significatives (P<0.01) calculées à partir des données de tous les sites.

Tableau 11 : Constantes et Coefficients de détermination r² des équations de régression

Variables	Variables Indépendantes									
Dépendantes	Argile.	Limon	Kéxch	Nav	C/N	CEC	Ntot planteT ₀	CAU	Constant	r ²
Ntot planteT ₀	-3.55	3.58	122.71	1.74					-32.30	0.92
NdfF%					4.98	-4.94			-14.06	0.68
NdfF kg ha ⁻¹							0.18	0.35	46.66	0.62
NdfS %					-6.56	3.77			134.90	0.67
NdfS kg ha ⁻¹							0.84	0.39	-4.81	0.96

. Ntot plante (culture sans engrais azoté)

Pour une culture sans engrais azoté Ntot plante = NdfS, la prédiction du Ntot planteT₀ est intéressante ; avec un r² de 0.92, les principales variables explicatives sont : N minéralisable du sol (Nav), K échangeable et la texture (argile et limon).

. NdfF et NdfS (culture avec engrais azoté)

Avec un r² de 0.68, les principales variables explicatives de NdfF et NdfS sont : (i) le C/N et la CEC pour le NdfF% et le NdfS % ; (ii) le Ntot planteT₀ et le CAU% pour le NdfF et le NdfS (kg ha⁻¹).

Tableau 10 : Ntot plante, CAU%, NdfF, NdfS dans la partie aérienne de la plante et, N minéralisable initial du sol

Sites	Groupe de fertilité	Type champ *	Plante				Variables					N minéralisable		
			Matière sèche (MS)		Ntot plante		NdfF		NdfS		CAU	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	Nav-net
			T ₁ kg ha ⁻¹	T ₀ kg ha ⁻¹	T ₁ kg ha ⁻¹	T ₀ kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
2	1	cc	4855	2656	37.0	24.1	33.99	12.73	65.62	24.3	16.16	1.82	7.35	7.28
7	1	cc	12182	7502	94.2	76.3	19.29	18.51	80.35	75.7	22.41	2.39	25.34	11.50
9	1	cc	19538	13285	148.8	138.6	21.71	32.79	77.96	116.0	12.78	7.54	18.52	29.90
16	1	cc	16575	15846	193.8	166.2	28.54	53.22	72.54	140.6	34.61	1.89	46.30	1.97
18	1	cc	5905	3602	53.3	34.3	17.92	9.56	82.06	43.7	23.75	1.60	9.82	1.35
20	1	cc	8824	3716	62.9	35.5	25.71	23.15	44.66	28.1	34.29	2.02	11.15	6.14
24	1	cc	14656	10908	127.0	113.0	24.67	31.34	75.32	95.7	17.53	2.74	28.98	22.30
3	2	cb	5348	2451	52.1	21.9	42.60	22.10	57.59	30.0	37.85	2.72	13.38	15.51
5	2	cb	5275	1431	41.0	10.9	50.45	20.72	49.42	20.2	37.67	1.69	11.17	9.71
6	2	cb	5110	2148	49.4	18.7	58.29	28.79	41.68	20.6	38.51	1.62	2.44	9.30
14	2	cb	9110	2317	72.6	20.5	56.39	32.08	43.23	31.4	65.34	1.58	7.96	6.66
17	2	cb	1726	1184	18.8	8.3	62.82	11.86	36.82	6.9	13.15	1.75	5.47	5.53
19	2	cb	4869	2938	51.8	27.2	48.86	25.44	50.86	26.3	30.85	1.62	6.04	8.65
22	2	cc	10795	7527	108.5	76.6	12.98	15.19	86.11	93.3	39.97	2.41	7.83	—
1	3	ci	17782	14263	184.8	149.1	25.71	46.71	74.73	138.1	44.78	15.76	31.63	25.97
4	3	ci	8955	6738	97.4	68.1	50.92	49.63	49.05	47.8	36.77	2.17	8.83	3.10
8	3	ci	10038	7278	66.2	73.9	38.50	25.47	61.51	40.7	-9.72	1.95	17.68	5.46
10	3	cc	10301	5072	72.1	50.2	39.61	29.02	59.75	43.1	27.53	2.50	13.98	5.43
11	3	ci	5358	4879	51.1	48.1	24.27	11.10	78.28	40.0	3.78	1.75	14.11	3.33
12	3	ci	9594	4884	74.2	48.1	27.13	20.48	72.41	53.7	32.72	3.22	6.99	3.66
13	3	ci	7516	6684	68.0	67.5	19.72	13.43	80.24	54.5	0.56	3.09	16.46	15.48
23	3	ci	13384	7576	98.9	77.1	17.34	16.85	82.96	82.0	27.27	1.71	11.95	5.85
25	3	cc	10036	5265	89.7	52.2	35.58	32.18	64.14	57.6	47.03	1.73	11.06	16.72
26	3	ci	12630	9160	136.5	94.2	28.44	39.12	71.35	97.4	53.13	3.66	18.83	18.33

Chaque valeur de Ntot plante, NdfF, NdfS et CAU est la moyenne de 2 répétitions

Nav-net = N minéralisable par la méthode Waring-Bremner

- Relations entre variables dépendantes (Ntot planteT₀, NdfF et NdfS) et variables indépendantes (Ntot planteT₀, CAU% et caractéristiques du sol) selon le groupe de fertilité

- Groupe 1 : champs de case (sols fertiles)

Les régressions significatives ($P < 0.01$) calculées à partir des données de ce groupe sont dans le tableau 12.

Tableau 12 : Constantes et coefficients de détermination r^2 des équations de régression dans le groupe des sols fertiles (groupe 1)

Variables	Variables Indépendantes						
Dépendantes	Limon	N-NH ₄ ⁺	Kéxch	Ntot planteT ₀	CAU	Constant	r^2
Ntot planteT ₀		14.51	311.7			-67.17	0.93
NdfF kg ha ⁻¹				0.24	56.75	-7.20	0.94
NdfS %	4.43					11.38	0.65
NdfS kg ha ⁻¹				0.79		8.27	0.98

. Ntot plante (culture sans engrais azoté)

La prédiction du Ntot planteT₀ est intéressante ; avec un r^2 de 0.93, les principales variables explicatives sont : le Kéch et le N-NH₄⁺ du sol.

. NdfF et NdfS (culture avec engrais azoté)

La principale variable explicative de NdfS (kg ha⁻¹) est le Ntot planteT₀ ($r^2 = 0.98$). Les principales variables explicatives de NdfF (kg ha⁻¹) sont le Ntot planteT₀ et le CAU%. Pour le NdfS%, la principale variable explicative est la texture mais la prédiction est moins bonne ($r^2 = 0.65$ avec $P < 0.05$). Pour le NdfF% aucune prédiction n'est possible ($r^2 < 0.6$).

- Groupe 2 : champs de brousse (sols très peu fertiles)

Le tableau 13 présente les régressions significatives ($P < 0.01$) calculées à partir des données du groupe des sols très peu fertiles.

Tableau 13 : Constantes et coefficients de détermination r^2 des équations de régression dans le groupe des sols très peu fertiles (groupe 2)

Variables	Variables Indépendantes								
Dépendantes	Argile	Limon	N-NH ₄ ⁺	K éch	pHCo	Nav	Taux saturation	Ntot sol	Constant r^2
Ntot planteT ₀	-9.28	5.30	30.29	651.35	-26.37				-237.4 0.95
NdfF%						-0.009			0.69 0.77
NdfF kg ha ⁻¹							-137.04	82.3	131.55 0.95
NdfS %						0.97			30.13 0.78

. Ntot plante (culture sans engrais azoté)

Dans ce groupe de sols très pauvres, beaucoup de variables apparaissent dans l'expression de Ntot planteT₀ : la texture (argile et limon), N-NH₄⁺, le Kéch et le pH ($r^2 = 0.95$).

. *NdfF et NdfS (culture avec engrais azoté)*

Aucune variable explicative n'apparaît pour le NdfS kg ha⁻¹ ; En revanche, pour le NdfF kg ha⁻¹, le Ntot sol et le taux de saturation apparaissent comme variables explicatives ($r^2 = 0.95$). Pour le NdfS % et le NdfF %, le Nav (N minéralisable) est la seule variable explicative ($r^2 = 0.78$).

- **Groupe 3 : champs intermédiaires (sols peu fertiles)**

Le tableau 14 fait apparaître les régressions significatives ($P < 0.01$) calculées à partir des données du groupe 3.

Tableau 14 : Constantes et coefficients de détermination r^2 des équations de régression dans le groupe des sols peu fertiles (groupe 3)

Variables Dépendantes	Variables Indépendantes						Constant	r^2
	Argile	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃	pHCo	C/N	Ntot planteT ₀		
Ntot planteT ₀		3.51	2.09				27.98	0.85
NdfF kg ha ⁻¹	-3.04			17.43	-6.70		21.12	0.99
NdfS %	2.74						55.15	0.55
NdfS kg ha ⁻¹						0.84	45.19	0.92

. *Ntot plante (culture sans engrais azoté)*

La principale variable explicative du Ntot planteT₀ est le N minéral (N-NH₄⁺ et N-NO₃⁻) du sol avant culture ($r^2 = 0.85$)

. *NdfF et NdfS (culture avec engrais azoté)*

Les principales variables explicatives sont : pour NdfS kg ha⁻¹ : le Ntot planteT₀ et le CAU% ($r^2 = 0.92$) , pour NdfF kg ha⁻¹ : la texture, le pH et le C/N, pour NdfS% : le taux d'argile mais ce dernier n'explique qu'en partie la variation ($r^2 = 0.55$)

4.4.3 - Discussion conclusion

Pour l'ensemble des champs étudiés, une relation (régression multiple) est établie entre les variables NdfS (ou, en absence d'engrais, la variable Ntot planteT₀) et NdfF d'une part et des indicateurs facilement mesurables d'autre part. On montre que le NdfS et le Ntot planteT₀ peuvent être estimé avec une bonne précision (r^2 respectivement de 0.96 et 0.92) : (i) le NdfS peut être estimé à partir de deux indicateurs plante : le Ntot planteT₀ et le coefficient apparent d'utilisation de N engrais (CAU%). Il importe de noter ici que cette démarche est facile à mettre en œuvre et de plus peu coûteuse car elle ne nécessite pas d'analyses de sol ; (ii) le Ntot planteT₀ peut être estimé à partir de certaines caractéristiques physico-chimiques du sol : la texture, la teneur en Kéch. et le N minéralisable ; la relation inverse avec le taux d'argile

s'expliquerait par l'effet protecteur de l'argile sur la MOS et son influence négative sur le N minéralisable (Delphin, 1986 ; Machet et al., 1990). Notons que le P, longtemps considéré comme le premier facteur nutritionnel limitant du rendement des cultures dans les sols tropicaux, ne ressort pas comme variable explicative.

La représentation spatiale des groupes de fertilité montre qu'ils correspondent à trois zones de culture géographiquement distinctes, appelées traditionnellement : champs de case (groupe 1), champs de brousse (groupe 2) et champs intermédiaires (groupe 3), fonction de la distance à l'exploitation. Les champs de case reçoivent une forte fertilisation mais non maîtrisée (matière organique, engrais). Les champs de brousse éloignés du village ne sont pas fertilisés mais bénéficient quelque fois de jachères de courte durée (1 à 2 ans) ; leurs résidus culturaux sont totalement exportés. Les champs intermédiaires reçoivent une faible fertilisation minérale et organique. L'accroissement du N_{tot} plante et du N_{dfS} , dans le sens du groupe 1 vers le groupe 2, semble logique et s'explique par une augmentation de la fourniture de N par le sol que traduisent les résultats de N minéralisable (tableau 10). Ces résultats qui établissent un lien entre la gestion des champs et son effet sur la fertilité des sols confirment ceux de Lompo et al. (2000).

La mise en évidence, par voie statistique, de trois groupes de champs cultivés : champ de case, champ de brousse et champs intermédiaires, a permis d'affiner la recherche d'indicateurs.

Pour les champs de case, on obtient deux relations fortes : $N_{dfS} = f(N_{tot} \text{ plante } T_0)$ avec $r^2 = 0.98$; et $N_{dfF} = f(N_{tot} \text{ plante } T_0, \text{CAU}\%)$ avec $r^2 = 0.95$. Toujours pour les champs de case mais en absence d'engrais, on montre que le rendement en N du maïs ($N_{tot} \text{ plante } T_0$) est fonction de $N-NH_4^+$ et de Kéch du sol avant culture ($r^2 = 0.93$). Ces résultats présentent un intérêt pour la vulgarisation : ils montrent le besoin d'une fertilisation azotée starter et d'une fertilisation potassique pour le maïs dans les champs de case. Ce besoin en N starter du maïs est par ailleurs bien connu (De Geus, 1967).

Pour les champs de brousse, on est en présence d'un résultat paradoxal : pas de variable explicative pour le N_{dfS} mais en revanche, pour le N_{dfF} , deux variables explicatives : le N_{tot} sol (variable positive) et le taux de saturation (variable négative) avec un $r^2 = 0.95$. Les hypothèses avancées sur l'effet de ces deux variables sur le N_{dfF} sont les suivantes : (i) le N_{tot} sol représente le taux de MOS qui est un des facteurs majeurs de l'enracinement des plantes en sols sableux tropicaux, donc de la capacité de la plante à accéder à l'engrais (Nicou et Chopart, 1979 ; Cissé et Vachaud, 1988) expliquant ainsi la relation positive entre N_{tot} sol et N_{dfF} ; (ii) le taux de saturation : en raison de l'extrême pauvreté en N du sol des champs de brousse ($N \text{ minéralisable} < 30 \text{ kg ha}^{-1}$ sur 0-20cm), la principale source de N pour le maïs est l'engrais ; on sait que l'utilisation de N engrais par la plante (N_{dfF}) est, d'une façon générale,

conditionnée par la capacité de la plante à accéder à cet engrais (cf notre hypothèse sur l'enracinement ci-dessus) et par la capacité du sol à retenir l'engrais (par adsorption de NH_4^+). Le taux de saturation traduirait l'aptitude du sol à retenir l'engrais (le sol retient d'autant moins le NH_4^+ engrais qu'il est saturé, avec de plus un risque de volatilisation de NH_3) ; notons cependant que la variable « taux de saturation » a un poids faible par rapport à la variable « N total ». Toujours pour les champs de brousse, en absence d'engrais, le Ntot planteT_0 varie positivement en fonction de N-NH_4^+ , de Kéch, et des limons, et varie négativement en fonction de l'argile et du pH, avec un poids considérable de la variable Kéch. *Pour les champs intermédiaires*, on obtient une relation forte entre NdfS d'une part, et Ntot planteT_0 et $\text{CAU\%}$ d'autre part ($r^2 = 0.92$). En absence d'engrais, le principal indicateur de Ntot planteT_0 est le N minéral du sol avant culture, confirmant comme pour les champs de case, le besoin du maïs en N starter.

En conclusion, il ressort de cette étude que la fertilité des sols en milieu paysan est liée principalement au mode de gestion des terres (les plus proches des habitations sont les plus fertilisés). De façon générale pour l'ensemble des champs, les indicateurs de NdfS et de NdfF pour le maïs sont le $\text{CAU\%}$ et le Ntot planteT_0 . Ces données sont facilement mesurables. Le domaine de validité de ces indicateurs est renforcé du fait qu'ils sont définis sur une large gamme de fertilité des sols. Cette étude montre également que dans les sols très pauvres (champs de brousse), le taux de MOS est la contrainte majeure à l'absorption de N engrais (NdfF) par le maïs.

Le Ntot planteT_0 (le rendement en N du maïs en absence d'engrais) quant à lui est fonction : (i) de la texture mais cette variable n'est pas « manipulable », (ii) de la teneur du sol en N minéral et en K avant culture qui sont des variables « manipulables ». D'ores et déjà un tel résultat permet de formuler une recommandation en matière de fertilisation du maïs, à savoir, la nécessité d'apporter une fumure azotée starter et une fumure potassique.

5 – Chapitre 5 : LES PERTES GLOBALES D'AZOTE HORS DU

<u>SYSTEME SOL-PLANTE</u>	79
5.1 – Introduction	79
5.2 - Matériel et méthodes	81
5.3 – Résultats	82
5.4 – Discussion	83

5 - Chapitre 5 : LES PERTES GLOBALES D'AZOTE HORS DU **SYSTEME SOL-PLANTE.**

5.1 - Introduction

Le système sol-plante est régi par des flux d'entrée (inputs) et de sortie (outputs) dont la somme algébrique exprime une variation ΔN qui s'enregistre au niveau du sol. Les premières mesures d'un tel bilan remontent au-delà des années 50 comme indiqué dans la synthèse faite par Allison (1955). Avant de préciser la nature et l'importance de ces flux, il est nécessaire de bien préciser l'échelle à laquelle doit se situer cette évaluation. En effet, si la notion d'input ou d'output est sans ambiguïté en ce qui concerne les engrais minéraux, la fixation biologique de N_2 , les pertes par lixiviation ou dans l'atmosphère, elle nécessite une clarification en ce qui concerne la fumure organique, les exportations par les récoltes et d'une façon générale les transferts de fertilité. A cet égard, il convient de distinguer les restitutions organiques et minérales dues à la culture en place, des apports exogènes qui réalisent en fait un transfert de fertilité. L'avantage de celles-là en système cultural amélioré est de freiner la baisse du niveau de fertilité alors que celles-ci (exogènes) sont susceptibles d'enrichir le capital fertilité, du moins de le maintenir, mais à des degrés différents selon les dimensions de l'unité de production à laquelle on s'adresse : le champ, le bassin versant, l'exploitation et le pays. Cette notion d'échelle s'applique tout particulièrement au raisonnement de la fumure par le fumier selon qu'elle réalise ou non un transfert de fertilité.

Dans la présente étude, le bilan N est raisonné à l'échelle de la parcelle et s'appuie sur le schéma conceptuel présenté à la figure 16. Les inputs N sont : N engrais (NF), N de la fixation symbiotique de N_2 (NFix) et de la fixation libre de N_2 (Nfix), N des pluies et des dépôts atmosphériques (Np). Les outputs N sont : N exporté par les récoltes (Nex), N sous forme de gaz volatilisé et dénitrifié (Ng), N lixivié (NI) et N de l'érosion (Ner).

L'importance des inputs et des outputs dépend largement des processus impliqués dans les systèmes étudiés. La rigueur des résultats dépend également de ces processus ; ainsi, les résultats concernant les précipitations, les engrais, la fixation symbiotique de N_2 , l'exportation de N par les plantes (Nex), sont-ils relativement rigoureux tandis qu'une incertitude assez grande affecte les résultats de fixation libre de N_2 (Nfix), des pertes gazeuses (Ng) et des pertes dans et sur le sol (NI et Ner).

Excepté pour Nex, NI et Ner, la majorité des autres processus est de nature microbiologique, en particulier la fixation de N_2 et la dénitrification. Ainsi, l'étude des flux de N dans le système sol-plante est-elle étroitement liée à l'étude microbiologique de ces processus que nous n'aborderons pas dans notre étude mais pour lesquels nous ferons référence aux auteurs qui s'y sont consacrés.

Cette étude a pour objectif de quantifier les pertes globales de N par la méthode des bilans décrite au chapitre 2, appliqué à l'essai longue durée de Saria. En absence de connaissance sur la fixation de N₂ du niébé (NFix), la monoculture continue de sorgho a été choisie pour la quantification de ce bilan et des pertes globales.

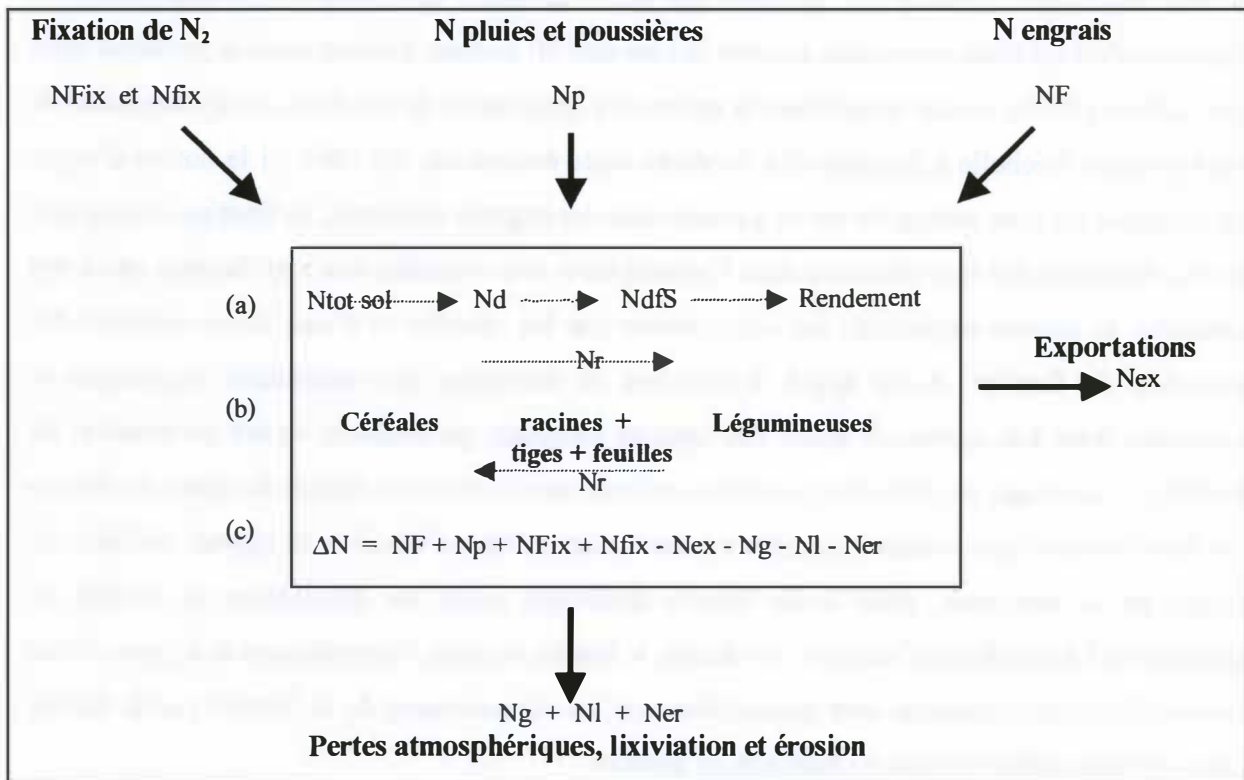


Figure 16. : Schéma représentant les entrées (inputs) et sorties (outputs) de N dans le système de culture céréale-légumineuse et son fonctionnement interne. Ligne (a) : rôle central du pool d'azote minéralisable (Nd) dans la formation du rendement ; ligne (b) : transferts internes ; ligne (c) : équation du bilan de N.

Ntot sol : Azote du sol

Np : Azote provenant des pluies et poussières

NdfS : Azote de la plante provenant du sol (Nitrogen derived from soil)

NFix : Azote provenant de la fixation symbiotique de N₂

Nfix : Azote provenant de la fixation libre et rhizosphérique de N₂

Nd : Azote disponible : pool d'azote minéralisable (quantité d'azote minéralisable à la disposition d'une culture).

Nr : Azote provenant des restitutions par la culture (racines + tiges + feuilles)

NF : Azote total de l'engrais

Nex : Azote exporté par les cultures

Ng : Azote volatilisé et dénitrifié (NH₃, N₂O et N₂)

Ner : Azote de l'érosion

Nl : Azote lixivié

5.2 - Matériel et méthodes

Les bilans de N sont calculés par la méthode des bilans appliquée aux résultats d'essai longue durée décrit au paragraphe 2.4. Les bilans de N sont calculés sur la période allant de 1960 à 1987 pour les traitements témoin (te), fumure minérale faible (fm), fumure minérale forte (FM), fumure organo-minérale faible (fmo), et fumure organo-minérale forte (FMO) de la monoculture de sorgho (série a). Ils portent sur les horizons 0-20 cm et 0-40 cm. Durant la période de 28 ans, deux sous-périodes sont retenues : une première avant chaulage allant de 1960 à 1978, et une seconde après chaulage allant de 1979 à 1987 (la chaux a été apportée après une forte baisse des rendements consécutive à une baisse du pH du sol et à l'apparition de l'aluminium échangeable (Al^{+++}) atteignant des teneurs, toxiques, supérieures à 25 cmol(+) kg^{-1} (Sedogo, 1993). Les différentes données utilisées sont obtenues de la façon suivante : (i) **le Ntot sol** est mesuré au laboratoire à partir d'un échantillon moyen de sol obtenu par mélange du sol des quatre répétitions, analyses faites en 1978 et 1987 (Pichot et al, 1981 ; Sedogo, 1993). Un problème s'est posé en ce qui concerne l'utilisation de la donnée Ntot sol₀ au départ de l'essai en 1960. En effet, les résultats de Ntot sol₀ dont nous disposions avaient été obtenus il y a 40 ans et, en absence d'informations sur la méthode de dosage de N, ne pouvaient être comparés à des résultats obtenus beaucoup plus récemment vraisemblablement par une autre méthode de dosage, pour calculer un bilan N. Devant cette difficulté, nous avons émis l'hypothèse que le sol de la jachère jouxtant l'essai (jachère maintenue en place depuis le début de l'essai) présente des caractéristiques physico-chimiques identiques à celles du sol qui existait au début de l'essai (on sait en effet que cet essai a démarré en 1960 après une jachère similaire à celle qui était en place en 1987 et qui est toujours présente). Ce sol sous jachère ayant été analysé avec le sol de l'ensemble des traitements de l'essai en 1987, il devient alors possible de faire des comparaisons. Nous avons donc pris en compte pour le calcul du bilan N : les résultats d'analyses obtenus en 1987 qui nous donnent le Ntot sol₀ par analogie et le Ntot sol₂₈ obtenus lors d'un même dosage, les résultats d'analyses obtenus en 1978 (t₁₉) et en 1999 (t₄₀) dont nous savons que la méthode de dosage de N est identique à celle de 1987 ; (ii) **le Ntot plante** (N total des parties aériennes de la plante) est calculé à partir des rendements des récoltes en grains, panicules et pailles ($kg\ MS\ ha^{-1}an^{-1}$) et du N % de ces différents organes pour chaque traitement (annexes 13a à 13e) ; (iii) **les données non mesurées** sont tirées de la bibliographie. Il s'agit de Np et Nfix : Np est estimé à 3 $kg\ N\ ha^{-1}an^{-1}$ (paragraphe 2.3) ; Nfix varie de 2 à 7 $kg\ ha^{-1}an^{-1}$ en fonction du niveau d'intensification du système de culture (paragraphe 2.3) ; appliquées aux traitements de l'essai longue durée, les valeurs de Nfix sont : 2 $kg\ ha^{-1}an^{-1}$ pour le témoin, 5 $kg\ ha^{-1}an^{-1}$ pour fm et pour fmo, et 7 $kg\ ha^{-1}an^{-1}$ pour FM et pour FMO. Rappelons l'équation générale du bilan :

$$\Delta N = \sum \text{inputs (entrées de N)} - \sum \text{outputs (sorties N)}$$

avec :

- . les inputs sont : Nfix, Np, NF ; ils sont désignés par Y dans l'équation du bilan ;
- . les outputs connus sont : Nex que nous désignons par Z dans l'équation du bilan ;
- . les outputs inconnus = pertes globales sont : Ng, Nl, Ner, représentés par X dans l'équation du bilan.

X est l'inconnu que nous allons quantifier globalement pour chaque sous-période, sa valeur annuelle (pertes par an correspondant à chaque période) est obtenue en divisant la valeur globale par le nombre d'années de la période considérée.

$$X = \sum \text{outputs inconnus} = \text{pertes totales de N hors du système sol-plante durant } n \text{ années de } t_0 \text{ à } t_n$$

$$Y = \sum \text{inputs} = \sum N_{\text{fix}} + \sum N_p + \sum N_F$$

de t_0 à t_n

$$Z = \sum \text{outputs connus} = \sum N_{\text{ex}}$$

de t_0 à t_n

$$\Delta N_{\text{sol}} (0-20 \text{ cm}) = N_{\text{tot sol}} (0-20 \text{ cm}) \text{ départ} - N_{\text{tot sol}} (0-20 \text{ cm}) \text{ arrivée}$$

Ces différentes variables vérifient la relation suivante :

$$X = Y - Z + \Delta N_{\text{sol}}$$

Si le système sol-plante est à l'équilibre organique :

$$\Delta N_{\text{sol}} = 0 \Rightarrow X = Y - Z$$

5.3 - Résultats

Le tableau 15 représente les variations de Ntot sol dans le temps et le tableau 16 les pertes globales de N enregistrées entre 1960 et 1987.

Période avant chaulage (1960-1978)

Les pertes globales de N en prenant l'horizon 0 - 20 cm sont de 3, 20, 8, 63 et 225 kg N ha⁻¹an⁻¹ respectivement pour le te, fm, fmo, FM et FMO.

Période après chaulage (1978-1987)

Les pertes globales de N en prenant l'horizon 0 - 20 cm sont de 6, 11, 68, 9 et 77 kg N ha⁻¹an⁻¹ respectivement pour le te, fm, fmo, FM et FMO.

Période après deuxième chaulage (1988-1999)

Sur fm, le Ntot sol diminue de 0.294 ‰ en 1988 (t_{28}) à 0.268 ‰ en 1999 (t_{40}) et sur fmo le Ntot sol augmente de 0.283 ‰ en 1988 (t_{28}) à 0.301 ‰ en 1999 (t_{40}). Il est intéressant de noter que l'évolution de Ntot sol dans les 2 traitements est la même dans la période avant chaulage 1960-1978 et dans la période après deuxième chaulage 1988-1999 (l'explication est donnée à la page suivante).

Période générale (1960 - 1987)

Les pertes globales de N en prenant l'horizon 0 - 20 cm sont de 4, 17, 27, 46 et 177 kg N ha⁻¹an⁻¹ respectivement pour te, fm, fmo, FM et FMO. En prenant l'horizon 0 - 40 cm les pertes globales sont de 1, 14, 23, 44 et 160 kg N ha⁻¹an⁻¹ respectivement pour te, fm, fmo, FM et FMO.

5.4 - Discussion

La culture continue avec engrais mais sans amendement du sol (fumier ou chaux) acidifie le sol et engendre des pertes de N liées positivement à la dose d'engrais, respectivement de 20 et 63 kg N ha⁻¹an⁻¹ pour la fumure faible et la fumure forte. L'apport de chaux ou de fumier (à une dose moyenne de 5 t MS ha⁻¹ tous les 2 ans) réduit, voire supprime les pertes. En revanche, la combinaison chaux + fumier provoque des pertes importantes de N, et, à très forte dose de fumier (40 t MS ha⁻¹ tous les 2 ans), les pertes sont très élevées (225 kg N ha⁻¹an⁻¹). L'hypothèse avancée pour expliquer cette inter-action « fumier x chaux » sur l'accroissement des pertes est celle d'une stimulation de la minéralisation du fumier et de la volatilisation due à la chaux. Il est intéressant de noter qu'en présence d'une très forte dose de fumier, le chaulage réduit les pertes de N de 225 à 77 kg N ha⁻¹an⁻¹, vraisemblablement en raison d'un effet protecteur de la chaux et des ions Ca⁺⁺ plus précisément sur la MOS qui exprimée en Ntot sol atteint un niveau considérable pour ce type de sols de 0.635 ‰ qui ne peut s'expliquer que par une humification poussée de la MOS (Coulson, 1960 ; Jacquin, 1963).

Sous culture continue sans engrais les pertes d'azote sont très faibles si l'on considère l'horizon 0 - 40 cm. Pour ce type de culture sans intrant, la diminution de Ntot sol enregistrée est inévitable pour fournir le N aux plantes en complément des inputs N (pluies, dépôts atmosphériques, fixation libre de N₂) avec très peu de déperdition de N.

Cette étude présente un triple intérêt : (1) elle situe le niveau des pertes d'azote (par lixiviation et dans l'atmosphère) dans un agrosystème de la zone écologique de Saria ; par exemple, en absence de chaulage, elles sont de l'ordre de 3, 20 et 63 kg N ha⁻¹ selon le niveau de fertilisation minérale : nul, faible et élevé ; (2) elle renforce l'hypothèse d'un

accroissement des pertes de N sous l'action de l'intensification des cultures, avec un effet marqué de l'amendement du sol (chaulage et/ou apports de fumier) : il est conseillé d'amender le sol par la chaux ou par le fumier mais de ne pas combiner les deux.

Les effets de la fertilisation et du fumier à long terme que nous venons de mettre en évidence, sont corroborés par les résultats de N_{tot} sol obtenus récemment sur la période post effet chaulage de 1988 à 1999, résultats qui montrent clairement : (1) que le chaulage réalisé en 1988 n'a plus d'effet sur le sol [d'après Sedogo (1993) son effet dure 6 à 8 ans], ce qui entraîne sur fm une acidification du sol (attestée au tableau 17) et une diminution de N_{tot} sol, (2) que le fumier qui continue à être apporté tous les 2 ans, en absence de chaulage (effet chaulage ayant disparu), exerce de nouveau son effet favorable sur le N_{tot} sol qui remonte comme cela avait été observé de 1960 à 1978.

Les pertes de N observées sont attribuables à la volatilisation, à la dénitrification et à la lixiviation, les pertes de N par ruissellement et par érosion étant considérées comme négligeables en zone de topographie plane. Les pertes par lixiviation sont estimées au chapitre 6. Elles sont de 8, 10 et 6 pour te, fm et fmo. Ces mêmes traitements, en présence de chaulage, présentent des pertes globales de 6, 11 et 68 kg N ha⁻¹an⁻¹ ou 3, 20 et 8 kg N ha⁻¹an⁻¹ en absence de chaulage. La confrontation de ces résultats permet de dégager des tendances quant à l'origine des pertes mais ne peut en aucun cas donner une valeur quantifiée des pertes dans l'atmosphère car le résultat de lixiviation est celui d'une seule année et n'est pas une moyenne portant sur une longue période à l'instar des résultats de pertes globales. Cette confrontation semble indiquer que les pertes de N sous forme gazeuse sont faibles voir nulles en absence de fumier, mais élevées en présence de fumier. L'hypothèse de pertes de N par dénitrification est avancée.

Tableau 15 : N total du sol (‰ Ntot sol) et variation de N total sol (ΔN kg ha⁻¹) au cours du temps à Saria 1960-1987.

(Source : Pichot et al., 1981 ; Sedogo, 1993). On a ajouté pour fm et fmo le Ntot sol obtenu en 1999 (t₄₀) à partir de nos analyses.

	te			fm				fmo				FM			FMO		
	t ₀	t ₁₉	t ₂₈	t ₀	t ₁₉	t ₂₈	t ₄₀	t ₀	t ₁₉	t ₂₈	t ₄₀	t ₀	t ₁₉	t ₂₈	t ₀	t ₁₉	t ₂₈
‰ Ntot sol (0-20 cm)	0.310	0.280	0.245	0.310	0.280	0.294	0.268	0.310	0.440	0.283	0.301	0.310	0.200	0.257	0.310	0.540	0.635
‰ Ntot sol (0-40 cm)	0.300		0.281	0.300		0.303		0.300		0.305		0.300		0.280	0.300		0.529
ΔN 0-20 cm		99	214		99	53			-429	89			363	175		-759	-1073
ΔN 0-40 cm			133			-22				-31				135			-1561

ΔN = Ntot sol départ - Ntot sol arrivée

ΔN est calculé sur 2 périodes : 1960 (t₀) à 1978 (t₁₉) période avant chaulage,

1978 (t₁₉) à 1987 (t₂₈) période après chaulage.

1988 (t₂₉) à 1999 (t₄₀) période après 2^{ème} chaulage, sur fm et fmo uniquement.

Densité apparente du sol 0 - 20 cm : 1.65

Densité apparente du sol 20 - 40 cm : 1.75

Tableau 16 : Pertes annuelles (X) de N dans 2 horizons : (1) = 0 - 20 cm et (2) = 0 - 40 cm à partir de

l'équation : $X = Y - Z + \Delta N$

Variables calculées		te			fm			fmo			FM			FMO		
kg N ha ⁻¹		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Inputs (Y)		95	45	140	651	447	1098	1403	573	1976	1335	630	1965	6476	1968	8444
Outputs (Z)		137	106	243	377	302	679	829	483	1312	506	359	864	1441	962	2403
ΔN 0-20 cm		99	116	214.5	99	-46	52.8	-429	518	89.1	363	-188	175	-759	-314	-1073
ΔN 0-40 cm				133			-22			-31			135			-1561
Pertes N	(1)	57	55	112	373	99	472	145	608	753	1192	83	1276	4276	693	4969
(X)	(2)			30			397			633			1236			4481
Pertes N	(1)	3	6	4	20	11	17	8	68	27	63	9	46	225	77	177
annuelles	(2)			1			14			23			44			160

Y et Z proviennent des annexes 13a à 13e ; ΔN provient du tableau 15.

a : période allant de 1960 à 1978 (19 ans)

b : période allant de 1978 à 1987 (9 ans)

c : période allant de 1960 à 1987 (28 ans)

6 - <u>Chapitre 6 : LES PERTES D'AZOTE PAR LIXIVIATION</u>	88
6.1 – Introduction.....	88
6.2 - Matériel et méthodes.....	89
6.3 – Résultats.....	90
6.4 – Discussion.....	90

6 - Chapitre 6 : LES PERTES D'AZOTE PAR LIXIVIATION

6.1 - Introduction

La lixiviation de N est un phénomène qui concerne presque uniquement l'anion NO_3^- qui est très peu retenu par le complexe organo-minéral du sol ; la plus grande partie de N minéral perdu par lixiviation se trouve sous forme NO_3^- (Guiraud, 1984). La quantité de NO_3^- présente dans un sol et susceptible d'être lixiviée dépend de plusieurs facteurs : (1) le sol : taux de minéralisation de N (l'activité microbienne), l'état de surface, nu ou avec plante (partage entre ruissellement et infiltration), caractéristiques chimiques (pH, MO, C/N), et physiques (texture, structure) du sol ; (2) le climat, surtout la pluviométrie (teneur en eau supérieure à la capacité de rétention) ; (3) le type d'utilisation de la terre (Viten et Smith, 1993). Dans les pays à agriculture intensive, utilisant de fortes doses de fertilisants minéraux (engrais azotés) et organiques (lisiers), la lixiviation est responsable de la pollution en nitrates des nappes souterraines et aussi de certaines eaux de surface. A ce titre, la fertilisation minérale et organique est considérée comme la pratique agricole la plus polluante des nappes aquifères (Henin, 1981, Sébillote et Meynard, 1990) ; sans oublier les nitrates provenant du stock de N du sol.

Les sols ferrugineux tropicaux sont sous l'influence de deux saisons : la 1^{ère}, sèche, se caractérisant par des radiations intenses de soleil et la 2^{ème} par des pluies. Ces sols, pauvres en matière organique, liant principal de leurs constituants, sont soumis en début et même pendant la campagne, à des pluies de forte intensité (cf chapitre 1), sources de ruissellement de drainage et d'érosion. Ces facteurs sont des sources de déperdition des éléments nutritifs présents dans le sol ou apportés par les engrais.

Certains auteurs partant du fait que la remontée de NO_3^- en période de sécheresse se limite aux 50 premiers cm du sol (Wetselaar, 1961), considèrent les quantités de NO_3^- au delà de ce profil comme des pertes (Wetselaar, 1962 ; Duke et Haise, 1973 ; Pratt et al., 1978 ; Guiraud, 1984). Cette étude porte sur la quantification des pertes en N provenant du sol et de l'engrais par lixiviation hors du système sol-plante. Il s'agira ici de N (nitrates surtout) se trouvant déplacé au-delà de l'horizon exploré par le système racinaire du sorgho, horizon que nous avons fixé à 90 cm de profondeur. Pour cela nous avons utilisé la méthode fondée sur la mesure *in situ* du bilan hydrique, du drainage ainsi que sur la mesure des teneurs en N de la solution du sol à partir des tensionics comme décrite ci-après.

6.2 - Matériel et méthodes

Matériel végétal

La variété utilisée est la SARIASO10, variété améliorée et mise en vulgarisation avec les principales caractéristiques indiquées en annexe 4.

Les tensionics

La description et le principe de fonctionnement figurent en annexe 14

Dispositif

L'essai a pour support le même essai longue durée de Saria, en place depuis 1960. Les traitements instrumentés sont te, fm et fmo de la monoculture de sorgho (voire paragraphe 2.5).

Les tensionics sont installés à raison de 3 tensionics pour le te, 7 tensionics pour le fmo et 7 tensionics pour le fm, repartis dans 3 répétitions pour te, 4 pour fm et 4 pour fmo.

Méthodes de calculs

Principe

Il s'agit de pouvoir quantifier le N minéral se trouvant dans la solution du sol au-delà des horizons explorés par les racines des cultures. Pour cela, les tensionics placés à 90 cm de profondeur, vont permettre les échanges ioniques entre la solution du sol et l'eau pure qu'ils contiennent, à travers leurs bougies poreuses. Partant de ceci, un équilibre ionique va s'établir entre les deux solutions au moins 8 jours après le remplissage des tensionics (Moutonnet et al., 1993) ; en ce moment, les concentrations en N dans la solution de tensionic sont équivalentes à celles de la solution du sol. Pour être bien sûr que les équilibres sont établis, ces solutions de tensionics séjournent 14 jours avant d'être prélevées à l'aide de seringues stériles, et conservées dans des vénojects stériles pour les analyses de N-NO_3^- et N-NH_4^+ . Les concentrations en N déterminées sont supposées équivalentes à celles de la solution du sol. On dosera aussi le Ca, le Mg et le K, intervenant dans la conductivité de la solution du sol.

Calculs

L'estimation de N lixivié nécessite la connaissance des quantités d'eaux drainées dans le système. Pour cela, le drainage est mesuré par simulation du bilan hydrique à partir du modèle SARAH (Baron et al., 1996) basé sur le modèle de bilan hydrique développé par Franquin et Forest (1977). Ce modèle permet d'évaluer, par calcul, le drainage associé aux coefficients culturaux de la plante de sorgho utilisée (Sariaso10, cycle de 120 jours). Les données suivantes ont été utilisées dans la simulation du drainage : pluviométrie (annuelle et journalière sur une période de 20 ans), ETP (station météorologique de Saria), coefficients culturaux du sorgho Sariaso10 et la croissance racinaire.

A chaque événement drainant, on associe, pour l'élément minéral dont on cherche à quantifier les pertes, la teneur de cet élément dans la solution de tensionic prélevée pendant la période

concernée. Lorsque le drainage intervient entre deux dates de collectes des solutions de tension, on affecte à cet épisode une concentration correspondant à la moyenne pondérée des teneurs encadrant cette période. La sommation des différentes quantités d'éléments minéraux ainsi calculés permet une estimation de la lixiviation pendant le cycle climatique considéré.

6.3 - Résultats

Les données principales sont représentées sur la figure 17 ; pour l'ensemble des résultats, se référer à l'annexe 15.

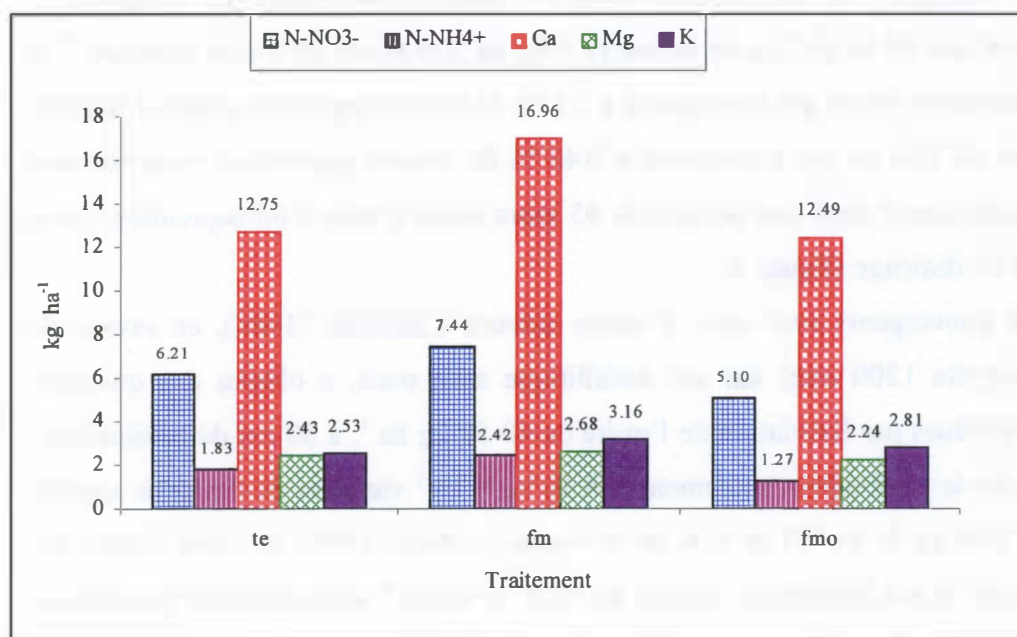


Figure 17 : Quantité d'éléments lixiviés à 90 cm de profondeur (essai longue durée de Saria)

N minéral drainé total fmo = 6.37 kg ha⁻¹ ; N minéral drainé provenant de l'urée ¹⁵N = 0.25 kg ha⁻¹
 N minéral drainé total fm = 9.86 kg ha⁻¹ ; N minéral drainé provenant de l'urée ¹⁵N = 4.39 kg ha⁻¹

Les quantités de N-NO₃⁻ lixivié sont de 6.2, 7.4, et 5.1 kg ha⁻¹an⁻¹ respectivement pour te, fm et fmo ; et respectivement de 1.8, 2.4 et 1.3 kg ha⁻¹an⁻¹ pour le N-NH₄⁺ (soit pour te, fm et fmo respectivement 8, 10 et 6 kg N minéral ha⁻¹an⁻¹).

Les quantités de K et de Mg sont très faibles, elles ne varient pas en fonction du traitement. Les quantités de Ca retrouvées dans la solution du sol sont respectivement de 13, 17 et 13 kg ha⁻¹ pour les traitements te, fm, fmo.

6.4 - Discussion

Dans les conditions de nos essais, le drainage est apparu pendant la période allant du début du mois d'août à la mi-septembre avec une quantité moyenne d'eau drainée d'environ 213 mm à

90 cm de profondeur du sol. C'est donc seulement pendant cette période de drainage effectif qu'il est possible d'observer des pertes de N par lixiviation, lixiviation qui est effectivement fonction des quantités d'eaux drainées (Cuttle et al., 1998 ; Brye et al., 2001). La quantité d'eau drainée est relativement importante comparée à celle mesurée par Smith et al. (1998) également à la cote de 90 cm, qui est de 97 mm pour un sol argileux cultivé en céréales.

Les résultats obtenus indiquent des quantités de N lixivié relativement faibles, de l'ordre de 10 kg ha^{-1} . On relève tout de même une différence entre les traitements. En effet le maximum de N lixivié est obtenu avec le traitement fin (10 kg ha^{-1}), suivi du te (8 kg ha^{-1}), et enfin du fmo (6 kg ha^{-1}). Cette différence est probablement liée à l'arrière effet bénéfique du fumier sur le drainage et les mécanismes de rétention des ions NO_3^- et NH_4^+ .

Par le suivi de N marqué ^{15}N , les résultats issus de l'analyse isotopique des solutions de tensionics indiquent que 45 % de l'azote lixivié (4.4 kg ha^{-1}) provient de l'urée marquée ^{15}N apportée sur le traitement fin ce qui correspond à 7.4 % de N-urée apportée, contre 4 % (0.25 kg ha^{-1}) pour celui du fmo ce qui correspond à 0.42 % de N-urée apportée. Ces pertes sont concentrées essentiellement dans une période de 45 jours allant d'août à mi-septembre, où se produit l'essentiel du drainage (figure 3)

Nos résultats sont convergents avec ceux d'autres auteurs. Chabalier (1980), en savane de Côte d'Ivoire (isohyète 1200 mm) sur sol ferrallitique sous maïs, a obtenu des quantités importantes de N perdues par lixiviation de l'ordre de $40\text{-}50 \text{ kg ha}^{-1}$, à 80 cm de profondeur ; en revanche à 45 cm de profondeur, seulement 3 et 10 kg N ha^{-1} viennent de l'engrais apporté à raison de 60 et 120 kg N ha^{-1} (3 et 5 % de N engrais) ; Pieri (1982) et Cissé (1986) ont mesuré des pertes de N par lixiviation variant de 10 à 50 kg ha^{-1} sous culture d'arachide et négligeables sous culture de mil.

En somme, les pertes de N par lixiviation sont conditionnées par de nombreux facteurs et paramètres dont la zone agroclimatique (régime pluviométrique, zone climatique), le type de sol, la fertilisation (type de fertilisants, quantité d'azote apporté), les pratiques culturales (travail du sol, irrigation ou non, type de culture et variété utilisée), la cote de drainage fixée pour la mesure.

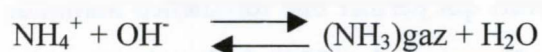
De cette étude, nous pouvons conclure à des pertes de N par lixiviation, à la cote de drainage de 90 cm de profondeur, faibles mais pas négligeables comparées à la pauvreté en N des sols du site d'étude. Elles sont plus importantes en condition de fertilisation minérale seule. Les pertes en N engrais sont cependant négligeables lorsque cet engrais est apporté en combinaison avec le fumier, mais importante sans fumier (de l'ordre de 10 % de N engrais). Ces pertes pourraient être plus importantes si l'on considérait le drainage à des profils moindres (drainage plus important dans les horizons de surface), comme le préconisent certains auteurs à 50 cm.

7 - Chapitre 7 : LES PERTES D'AZOTE PAR VOLATILISATION	93
7.1 – Introduction	93
7.2 - Matériel et méthodes	94
7.3 – Résultats	95
7.3.1 - Effets du niveau de fertilité du sol	95
7.3.2 - Effets de la toposéquence	96
7.3.3 - Effets de la localisation du champs : champ de brousse / champ de case	97
7.3.4 - Cinétiques de volatilisation de N engrais	97
7.3.5 - Relations entre les quantités de N urée volatilisé et les données des sols utilisés	100
7.4 – Discussion	101

7 - Chapitre 7 : LES PERTES D'AZOTE PAR VOLATILISATION

7.1 - Introduction

La volatilisation de l'azote consiste à un départ de l'ammoniac ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) vers l'atmosphère à partir du sol et quelques fois des plantes. La réaction caractéristique globale est la suivante :



Dans les couches superficielles du sol les pertes d'azote par volatilisation peuvent intervenir directement à partir de l'ammoniac en raison des équilibres entre les différentes formes d'azote ammoniacal :

- équilibre entre les ions ammonium absorbés sur le complexe argilo-humique et ceux de la solution du sol, qui dépend de la capacité d'échange du sol et de son degré de saturation ;
- équilibre entre les ions ammonium et l'ammoniac dissous dans l'eau du sol, qui dépend fortement du pH et de la température du sol ;
- équilibre entre l'ammoniac dissous et l'ammoniac gazeux dans l'atmosphère du sol , qui dépend de la concentration en ammoniac dans l'eau du sol et de sa température.

En conséquence, les pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac sont étroitement liées aux conditions du sol (pH, capacité d'échange, porosité), à son humidité (concentration de la solution du sol) et aux conditions climatiques (pluviométrie, température, condition de diffusion vers l'atmosphère) (Sommer et al., 1991) ; elles peuvent aller, par exemple, de quelques % à 90 % de l'azote ammoniacal apporté lors des épandages de lisiers, 50 % pour les apports d'engrais minéraux (Lauer et al, 1976 ; Sommer et al., 1991 ; Moal et al., 1995 ; Générmont, 1996). Ces émissions se produisent principalement dans les quelques jours qui suivent les apports (Cellier et al., 1996).

Dans les sols tropicaux généralement acides, les pertes par volatilisation d'ammoniac gazeux se produisent surtout à partir de l'urée. Ce processus apparemment paradoxal en sols acides est causé par l'accumulation d'azote ammoniacal suite à l'hydrolyse de l'urée qui augmente localement le pH et requiert des conditions propices à un faible rapport NH_4/NH_3 , rapport qui est fortement influencé par la CEC du sol, la température de la solution du sol, la dessiccation et surtout le pH de la solution du sol (Vlek et al., 1978 ; Sanogo, 1997).

L'objectif de la présente étude est la quantification des pertes en azote par volatilisation dans les conditions écologiques des systèmes culturels au Burkina Faso. Les principaux facteurs pouvant induire des pertes d'azote dans ces systèmes culturels et qui sont pris en compte ici, sont :

- 1) facteurs édaphiques : niveau de fertilité lié aux pratiques culturales, lié à la toposéquence et à la typologie des champs ;
- 2) Le facteur mode d'apport de l'urée : apport urée en surface ou enfouie à 5 cm.

7.2 - Matériel et méthodes

Les essais sont réalisés en laboratoire, à Saria, dans l'atmosphère ambiante du laboratoire. Le dispositif utilisé dans cette étude est un système ouvert qui permet une turbulence minimale de l'air à la surface du sol (figure 18) ; en effet, selon Freney et al. (1981), le flux d'ammoniac dans l'atmosphère est positivement relié à la vitesse de l'air à la surface du sol. L'ensemble des expériences dure 82 jours partant de mars à juin 2001 avec des températures variant de 29 à 32 °C. Chaque échantillon est répété 2 fois et chaque échantillon traité provient d'un échantillon moyen issu de 4 prélèvements. La provenance des sols est la suivante :

- six sols « contrastés » de l'essai longue durée de Saria (voir paragraphe 2.4) : deux systèmes de culture (monoculture de sorgho et rotation sorgho-niébé) x 3 traitements (te, fm et fmo) ;
- trois sols provenant de 3 niveaux de toposéquence : haut de pente, mi-pente et bas de pente ; la pente générale est de 7 ‰ ;
- deux sols provenant des champs de case et champs de brousse.

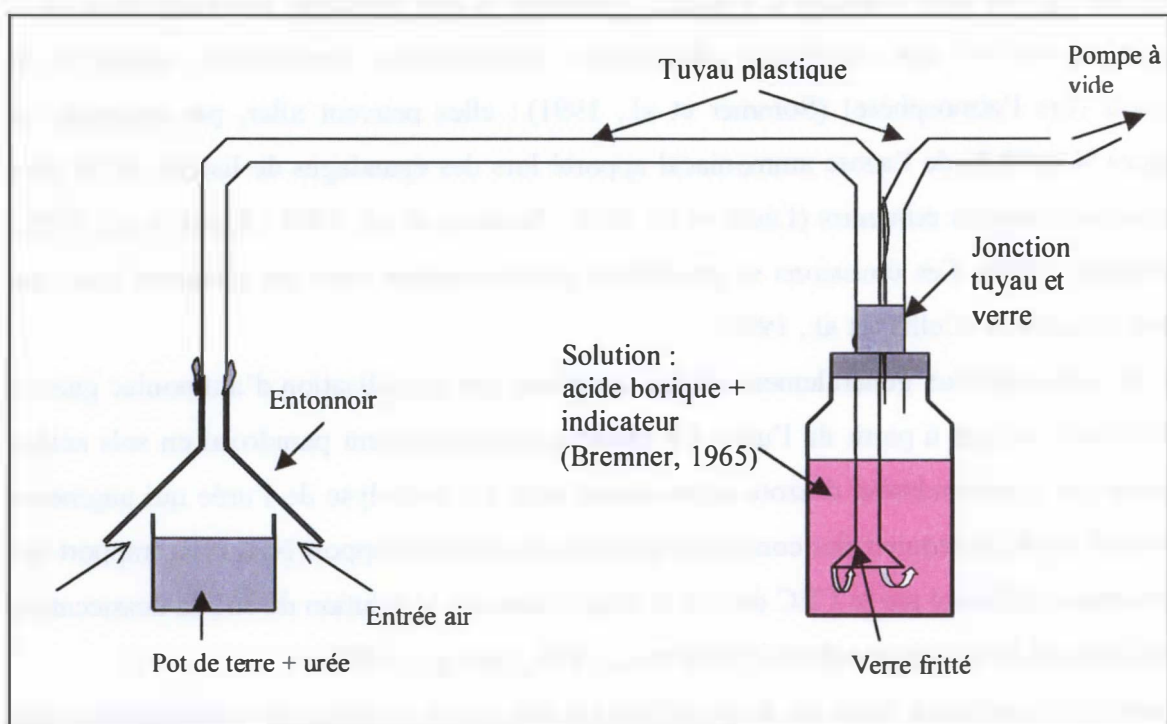


Figure 18 : Schéma du système de mesure de la volatilisation d'ammoniac à partir de l'urée apportée.

Fonctionnement du dispositif

Le principe de ce dispositif consiste à piéger l'ammoniac à l'aide d'une solution d'acide borique. Pour ce faire, l'échantillon de terre est placé dans un pot en plastique de surface connue ($S = 83,28 \text{ cm}^2$) à raison de 500 g/pot constituant une micro parcelle apte à recevoir les différents traitements. On y place un tube en verre pour l'addition d'eau dans le but de maintenir l'humidité de l'échantillon entre la capacité au champ et la capacité de rétention. Le pot est partiellement recouvert d'un entonnoir de façon à favoriser la circulation de l'air sur l'ensemble de la surface. Cette entité (pot de terre + entonnoir) est reliée à un flacon en verre contenant la solution d'acide borique avec l'indicateur coloré à l'aide d'un tube en verre fritté. Ce flacon est ensuite relié à une trompe à eau à l'aide d'un tuyau en plastique permettant de faire le vide dans le système. Ainsi lorsque le système est mis en fonction, le vide étant réalisé dans le flacon d'acide borique va permettre la circulation de l'air à travers l'espace entre l'entonnoir et le pot contenant l'échantillon de terre. Cet air véhicule l'azote volatilisé à travers le tube en verre fritté. Ainsi le contact de « air + azote volatilisé » avec la solution d'acide borique va permettre le piégeage de l'azote par l'acide borique. La titration de la solution d'acide borique avec de l'acide sulfurique 0,02N se fait à chaque virage de la solution. L'urée est apportée en granulée conformément aux pratiques paysannes au Burkina Faso en raison de 0,08 g par pot correspondant à 100 kg d'urée par hectare.

. Mode de calculs

$$N \text{ volatilisé (kg)} = V (\text{H}_2\text{SO}_4) \times N_{\text{norm}} \times 0,014 \text{ g} / 1000;$$

$$NF = q \times 46 / 100$$

$$q \text{ (g)} = Q \text{ (kg)} \times S \text{ (cm}^2) / 10^3$$

$N_{\text{apporté}}$: azote apporté par 100 kg d'urée

Q : urée kg ha^{-1}

V : volume d'acide sulfurique déplacé

$N_{\text{norm.}}$: normalité de l'acide utilisé

S : surface du pot

7.3 - Résultats

7.3.1 - Effets du niveau de fertilité du sol

Ces différents niveaux de fertilité ont été induits par des pratiques culturales contrastées sur une longue période dans l'essai de Saria.

Les résultats obtenus sur les sols de cet essai sont présentés au tableau 17.

Tableau 17 : Proportion de N urée volatilisée après un apport d'urée à la dose de 100 kg ha⁻¹, selon le niveau de fertilité du sol

Traitement	Profondeur enfouissement	CEC cmol(+) kg ⁻¹	pHeau	MOS %	Nvolat. %	Nvolat. kg ha ⁻¹
te (a)	Surface	2.75	6.75	0.39	19.18	8.8
	5cm	2.75	6.75	0.39	0.00	0.0
fmo (a)	Surface	2.90	6.41	0.55	20.13	9.3
	5cm	2.90	6.41	0.55	0.00	0.0
fm (a)	Surface	2.42	5.74	0.46	16.48	7.6
	5cm	2.42	5.74	0.46	0.76	0.4
te (c)	Surface	3.05	6.41	0.44	14.34	6.6
	5cm	3.05	6.41	0.44	0.00	0.0
fmo (c)	Surface	2.53	6.25	0.53	25.09	11.5
	5cm	2.53	6.25	0.53	0.00	0.0
fm (c)	Surface	2.09	5.64	0.46	25.13	11.6
	5cm	2.09	5.64	0.46	0.00	0.0

Quantité urée apporté : 100 kg ha⁻¹ (46 kg N ha⁻¹)

(a) : monoculture de sorgho ; (c) : rotation biennale sorgho-niébé

11 % < argile < 15 %

Rappelons la nature des pratiques culturales : (1) fertilisation : sans fertilisation (te), fertilisation minérale (fm), fm plus fumier (fmo), (2) rotation : sans rotation et avec rotation. L'analyse physico-chimique de ces sols (annexe 9) montre un effet positif du fumier sur le taux de MOS (MOS = C % x 1.72) qui passe de 0.39 sans fumier à 0.55 % avec fumier (tableau 17).

Les résultats mettent en évidence des pertes comprise entre 14 et 25 % de N urée apporté en surface et des pertes nulles lorsque l'urée est enfouie. Les pertes les plus élevées sont obtenues en sol fertilisé et sous rotation.

7.3.2 - Effets de la toposéquence

Les sols présentent des caractéristiques différentes selon leur position sur la toposéquence : la teneur en argile, la teneur en MOS et la CEC augmentent du haut vers le bas de pente et paradoxalement le sol devient plus acide (tableau 18 et annexe 9).

Les résultats de N volatilisé (tableau 18) confirment l'effet inhibiteur de l'incorporation de l'urée sur la volatilisation et mettent en évidence un effet très net de la position toposéquentielle avec une volatilisation respectivement de 2 %, 26 % et 32 % pour le bas, le milieu et le haut de pente, cette volatilisation étant inversement proportionnelle au taux d'argile et à la CEC.

Tableau 18 : Proportion de N urée volatilisée après un apport d'urée à la dose de 100 kg ha⁻¹, selon la toposéquence.

Position toposéquence	Profondeur enfouissement	Argile %	CEC cmol(+) kg ⁻¹	pHeau	MOS %	Nvolat. %	Nvolat. kg.ha ⁻¹
Haut pente	Surface	1.3	0.72	5.60	0.45	31.76	14.6
	5cm	1.3	0.72	5.60	0.45	0.00	0.0
Mi- pente	Surface	5.8	1.14	5.50	0.38	25.94	11.9
	5cm	5.8	1.14	5.50	0.38	0.00	0.0
Bas pente	Surface	30.1	4.84	5.45	1.66	2.05	0.9
	5cm	30.1	4.84	5.45	1.66	0.00	0.0

Quantité urée apportée = 100 kg ha⁻¹ (46 kg N ha⁻¹)

7.3.3 - Effets de la localisation du champ : champ de brousse / champ de case

Les résultats sont présentés au tableau 19.

Les sols des champs de brousse et de case présentent des différences assez marquées sur leur CEC et sur leur pHeau (légèrement acide en champ de brousse et alcalin en champ de case) mais sans effet sur la volatilisation qui se maintient autour de 23 à 25 %. On confirme de nouveau l'effet inhibiteur sur la volatilisation de N de l'incorporation de l'urée dans le sol.

Tableau 19: Proportion de N-urée volatilisée après un apport d'urée à la dose de 100 kg ha⁻¹, en fonction de la typologie des champs

Type de champs	Profondeur enfouissement	Argile %	CEC cmol(+) kg ⁻¹	pHeau	M.O. %	Nvolat. %	Nvolat. kg.ha ⁻¹
Champ de brousse	Surface	9.1	3.62	6.45	0.88	25.49	11.7
	5cm	9.1	3.62	6.45	0.88	0.00	0.0
Champ de case	Surface	7.9	5.78	8.25	0.95	23.02	10.6
	5cm	7.9	5.78	8.25	0.95	0.00	0.0

Quantité urée apportée = 100 kg ha⁻¹ (46 kg N ha⁻¹)

7.3.4 - Cinétiques de volatilisation de N engrais

Les cinétiques de volatilisation de N engrais apporté sur les différents sols sont illustrées par la figure 19, A à D.

La cinétique générale de volatilisation de N urée observée dans l'ensemble des sols étudiés est caractérisée par une phase initiale relativement basse suivie d'une augmentation rapide des quantités de N volatilisé jusqu'à un pic plus ou moins élevé et enfin une baisse progressive.

- début de la volatilisation

Le début de la volatilisation n'est pas uniforme sur tous les sols. En effet, dans les sols les mieux pourvus en MOS (fmo, Cc et mi-pente), la volatilisation commence 9 heures après l'apport de l'urée. Elle démarre plus tard sur les autres sols entre la 12^{ième} et la 20^{ième} heure après l'apport d'urée. Dans le cas des sols très peu fertiles (champs de brousse), la volatilisation a même commencé 30 heures après l'apport de l'engrais. Les premières valeurs enregistrées 9 h après l'apport de l'urée sont généralement inférieures à 5 %.

- pic de volatilisation

Au fil du temps, la volatilisation a atteint un maximum à des périodes différentes : au bout de 24 à 48 heures après les apports d'urée pour la plupart des sols, à l'exception des champs de brousse où il est intervenu 100 heures après. Aucune différence n'apparaît entre champs de brousse et champs de case sur les quantités, en revanche le démarrage de la volatilisation est beaucoup plus lent sur les champs de brousse. La rotation, par rapport à la culture continue, d'une façon générale, raccourcit la durée du plateau (la phase de volatilisation active), ce qui est très net sur le témoin où la durée passe de 168 h à 72 h.

- fin de la volatilisation

Dans les sols de l'essai longue durée, la fin de la volatilisation intervient entre 72 heures et 144 heures après l'épandage de l'urée sur les sols avec rotation et entre 120 et 192 heures après l'épandage de l'urée sur les sols sans rotation. La volatilisation est plus faible et plus étalée dans le temps sur les sols témoins.

Sur les sols des champs de brousse, la fin de la volatilisation est intervenue autour de 200 heures après l'apport de l'urée contre 100 heures pour les sols des champs de case.

Sur tous les sols de la toposéquence, la volatilisation cesse 72 heures après les apports d'urée.

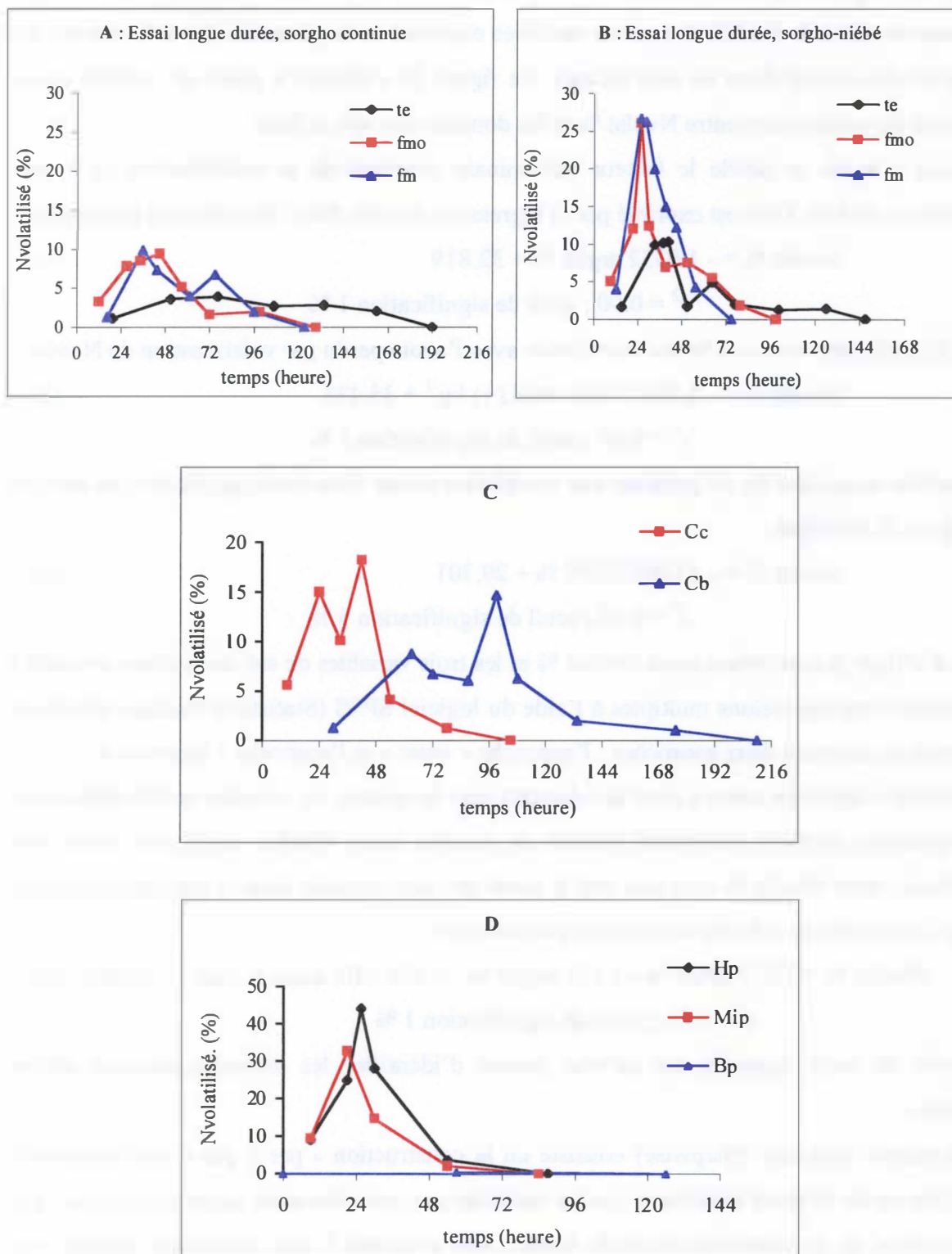


Figure 19 : Cinétiques de volatilisation de N engrais apporté en surface :
 C : sols des champs de brousse (Cb) et des champs de case (Cc) en milieu paysan ;
 D : sols d'une toposéquence de Saria haut (Hp), mi (Mip) et bas (Bp) de pente,
 pente générale 7 ‰

7.3.5 - Relations entre les quantités de N urée volatilisé et les données des sols utilisés

Les analyses statistiques consistent en l'établissement de corrélations entre les variables à partir des régressions avec comme variable dépendante N volatilisé en % (Nvolat %) pour l'ensemble des sols étudiés et comme variables explicatives les données des sols obtenus par analyses des échantillons de sols utilisés. La figure 20 réalisées à partir du logiciel Excel, présente les corrélations entre Nvolat % et les données des sols utilisés.

Le taux d'argile se révèle le facteur déterminant principal de la volatilisation de N urée apporté en surface. Ceci est exprimé par la régression linéaire dont l'équation est la suivante :

$$\text{Nvolat \%} = - 1.0352 \text{ argile \%} + 32.819 \quad (1)$$

$$r^2 = 0.90 ; \text{seuil de signification } 1 \%$$

La CEC présente aussi une bonne corrélation avec l'azote perdu par volatilisation de N urée :

$$\text{Nvolat \%} = - 5.7072 \text{ CEC cmol (+) kg}^{-1} + 35.433 \quad (2)$$

$$r^2 = 0.65 ; \text{seuil de signification } 1 \%$$

La matière organique du sol présente une corrélation moins forte mais significative au seuil de 5 % avec N volatilisé :

$$\text{Nvolat \%} = - 13.099 \text{ MOS \%} + 29.301 \quad (3)$$

$$r^2 = 0.41 ; \text{seuil de signification } 5 \%$$

Afin d'affiner la corrélation entre Nvolat % et les trois variables de sol, nous avons procédé à une analyse en régressions multiples à l'aide du logiciel SPSS (Statistical Package for Social Science) en adoptant deux approches : l'approche « enter » et l'approche « stepwise ».

La première approche (enter), dont les résultats sont en annexe 16, consiste en l'établissement de régression multiple maximum prenant en compte toute variable explicative ayant une corrélation avec Nvolat % quel que soit le poids de cette variable dans la régression multiple finale ; elle a aboutit à la régression multiple suivante :

$$\text{Nvolat \%} = 3.917 \text{ MOS \%} - 1.121 \text{ argile \%} - 0.673 \text{ CEC cmol (+) kg}^{-1} + 33.341 \quad (4)$$

$$r^2 = 0.91 ; \text{seuil de signification } 1 \%$$

L'intérêt de cette approche est qu'elle permet d'identifier les variables pouvant affiner l'analyse.

La deuxième approche (Stepwise) consiste en la construction « pas à pas » des régressions multiples en ne retenant seulement que les variables qui contribuent de façon significative à la construction de la régression multiple finale ; elle a aboutit à une corrélation simple avec l'argile identique à la relation (1) ci-dessus. L'avantage de cette approche réside dans le fait qu'elle rejette les variables influençant peu la régression multiple finale tout en maintenant un coefficient de détermination (r^2) élevé ce qui réduit considérablement le nombre de variables explicatives.

Les coefficients de détermination r^2 des régressions (1) et (4) étant très peu différents, nous retenons la relation (1).

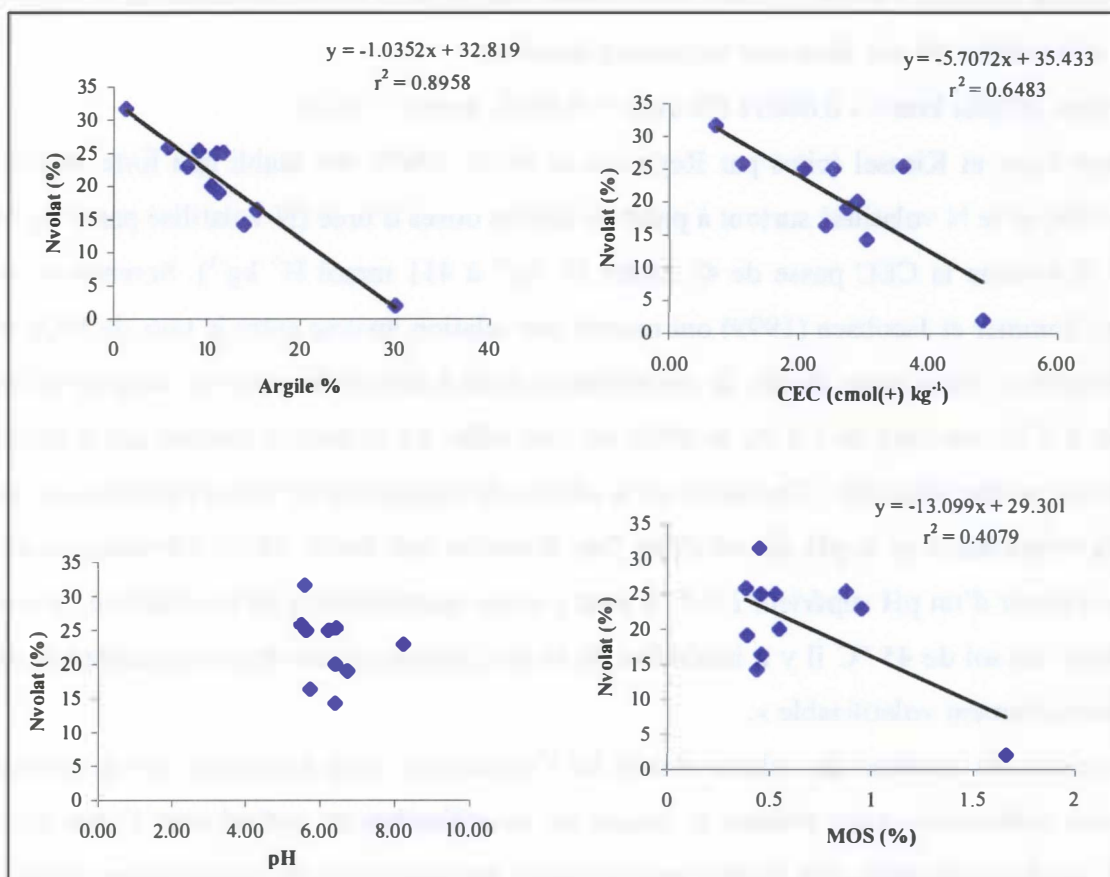


Figure 20 : Corrélations entre N volatilisé et les caractéristiques du sol : taux d'argile, CEC, pH et MOS.

7.4 - Discussion

Le N urée volatilisé varie de 14 % à 32 % sur l'ensemble des sols utilisés. L'essentiel de cette volatilisation s'est produit pendant les 48 heures suivant l'apport de l'urée. Notre étude fait ressortir les facteurs majeurs de cette volatilisation qui sont dans l'ordre décroissant des effets de ces facteurs sur la quantité de N volatilisé :

- effet incorporation : Nvolat passe de 25 % sans incorporation à 0 % avec incorporation ;
- effet toposequence : Nvolat passe de 2 % à 32 % du bas de pente vers le haut de pente, confirmant le rôle majeur de l'argile ;
- effet rotation / fertilisation : pas d'effet fumure / fertilisation sous monoculture continue ; en revanche, un effet fumure / fertilisation sous la culture en rotation. L'explication réside vraisemblablement dans un ralentissement donc un étalement de l'activité uréasique sous monoculture de sorgho.

Nos travaux confirment l'importance des facteurs édaphiques et des pratiques culturales sur le processus de volatilisation de l'azote dans le sol. Le taux d'argile est le déterminant majeur de

ce phénomène dans les sols étudiés ($r^2 = 0.90$). Il est suivi par la CEC ($r^2 = 0.65$) ; l'influence de la MOS ne ressort pas aux faibles teneurs (figure 20). Reynolds et Wolf (1987) avaient effectivement identifié l'argile comme déterminant majeur dans la volatilisation de N engrais apporté à la surface du sol, dans une régression linéaire :

$$\text{Rate of NH}_3 \text{ loss} = - 0.00651 (\% \text{ clay}) + 0.3967, \text{ avec } r^2 = 0.75.$$

Par contre Fenn et Kiessel (cites par Reynolds et Wolf, 1987), ont établi une forte relation entre la CEC et le N volatilisé surtout à partir de faibles doses d'urée (N volatilisé passe de 56 % à 20 % lorsque la CEC passe de 42 mmol H⁺ kg⁻¹ à 411 mmol H⁺ kg⁻¹). Sommer et al. (1991) et Sommer et Jacobsen (1999) ont montré une relation inverse entre le taux de MOS et la volatilisation. Dans notre étude, la volatilisation tend à être nulle pour un taux de MOS supérieur à 2 % ; en deçà de 1.5 %, la MOS est sans effet. La littérature montre que d'autres facteurs ont pu être identifiés : l'humidité et la vitesse de circulation de l'air (Thompson et al, 1990), la température et le pH du sol (Van Der Weerden and Jarvis 1997 ; Hermann et al., 2001), « à partir d'un pH supérieur à 8.5, il peut y avoir augmentation de N volatilisé ; à une température du sol de 45 °C il y a inhibition de la nitrification et une forte augmentation de NH₃ potentiellement volatilisable ».

Dans le cadre du système de culture étudié ici l'agriculteur peut intervenir sur le facteur « pratiques culturales » pour réduire le risque de volatilisation en enfouissant l'urée à au moins 5 cm de profondeur. On montre que ce risque est accru en sols sous rotation sorgho-niébé par rapport à la monoculture continue de sorgho. En revanche, il n'est pas possible d'agir sur le « facteur teneur en argile » ; cependant, sur la base d'une cartographie des teneurs en argile des sols, il est possible de dresser une carte des risques de volatilisation.

8 - Chapitre 8 : LES PERTES D'AZOTE PAR DENITRIFICATION	104
8.1 – Introduction	104
8.2 - Matériel et méthodes	104
8.3 – Résultats	106
8.3.1 - Effets des pratiques culturales	106
8.3.2 - Effets de la toposéquence	109
8.3.3 - Effets de la localisation du champ : champ de brousse / champ de case	110
8.4 – Discussion	110
8.5 - Conclusion, perspectives	111

8 - Chapitre 8 : LES PERTES D'AZOTE PAR DENITRIFICATION

8.1 - Introduction

On sait que les oxydes d'azote (N_2O , NO_x) provenant de la dénitrification participent à la destruction de la couche d'ozone, ainsi qu'à l'effet de serre de notre planète. En effet, Rodhe (1990) et Robertson (1993) soulignent ce danger en indiquant que le coefficient d'absorption radiative de N_2O est de 150 à 200 fois celui du CO_2 , et, tenant compte de la durée de vie de ce gaz dans l'atmosphère, signalent que la contribution d'une mole de N_2O à l'effet de serre serait de 250 à 300 fois supérieure à celle d'une mole de CO_2 . C'est la raison pour laquelle le N_2O a été identifié dans le Protocole de Kyoto (UNFCCC, 1997) comme faisant partie des six gaz à effet de serre pour lesquels chaque pays doit œuvrer à réduire les émissions (-95% du total de 1990 d'ici 2012).

D'un point de vue agronomique, les micro-organismes dénitrifiants entrent en compétition avec les cultures pour l'utilisation des nitrates, ce qui peut représenter une perte en N considérable atteignant 30 % dans certains agrosystèmes (Hauck, 1981). Dans les sols acides ($pH < 5$) le phénomène est plus lent que dans les sols proches de la neutralité ($pH 6$), l'optimum se situe entre le $pH 7$ et le $pH 7.5$ (les pH acides agissent négativement sur le développement des bactéries). Cependant, dans les régions tempérées à forte intensification agricole, les excès de nitrates dans les eaux sont parfois réduits par une technique fondée sur le processus de dénitrification (Henin, 1980 ; Hénault et Germon, 1995).

Certes, la production de ces gaz peut être considérée comme faible, voire négligeable à l'échelle de la parcelle cultivée, vu la faible utilisation des engrais azotés dans les pays émergents comme le Burkina Faso, mais un tel constat sous-estime les risques liés à une évolution des pratiques qui sont de deux ordres : (1) on assiste à un accroissement des importations d'engrais azotés et à l'extension des superficies cultivées au niveau national (INSD/Mina Agri, 1997), (ii) le développement de certaines pratiques telles que les plantes de couverture à base de légumineuses qui peut engendrer un surcroît de N minéral dans le sol (Azontondé, 2000). Conduite sur le type de sol le plus rencontré et le plus exploité au Burkina Faso avec les systèmes agraires les plus fréquents, la présente étude vise à évaluer le risque de dénitrification par deux sortes de mesures : la mesure de la dénitrification potentielle et la mesure de l'aptitude de ces sols à produire et à accumuler le N_2O , sur des sols secs remaniés.

8.2 - Matériel et méthodes

Les sols sont issus d'une même unité pédologique, celle des sols ferrugineux tropicaux lessivés (Guillobez, 1985) ou Luvisols (FAO, 1991). Chaque sol est prélevé en fin de saison sèche en 4 répétitions, broyé et tamisé à 2mm. Trois groupes de sols sont prélevés :

- sols « contrastés » issus de l'essai longue durée de Saria décrit au paragraphe 2.4 qui sont :
 - 1- sol sous monoculture de sorgho, sans fertilisation (te_a),
 - 2- sol sous monoculture de sorgho, avec fertilisation minérale (fm_a),
 - 3- sol sous monoculture de sorgho, avec fertilisation minérale + fumier (fmo_a),
 - 4- sol sous rotation biennale sorgho-niébé, sans fertilisation (te_c),
 - 5- sol sous rotation biennale sorgho-niébé, avec fertilisation minérale (fm_c),
 - 6- sol sous rotation biennale sorgho-niébé, avec fertilisation minérale + fumier (fmo_c).
- sols issus d'une toposéquence avec une pente générale de 7 ‰, non mise en valeur depuis plus de 10 années :
 - 7- sol de haut de pente,
 - 8- sol de mi-pente,
 - 9- sol de bas de pente.
- sols issus de deux types de champs sous gestion paysanne :
 - 11- sol d'un champ de brousse, éloigné du village,
 - 12- sol d'un champ de case, situé entre les maisons d'habitation des paysans.

Chaque échantillon de sol par type de champ est issu d'un mélange des échantillons provenant de 6 champs.

Les échantillons analysés sont représentatifs du sol de la parcelle ou du champ. Prélevés après une longue saison sèche (novembre à mai), ils sont rehumectés au laboratoire pour les mesures de dénitrification potentielle et de production de N_2O .

La méthode de mesure de la dénitrification utilisée est celle publiée par Hénault et al. (2001) pour le suivi *in vitro* de la capacité du sol à produire et à réduire ou accumuler le N_2O , sans addition de carbone. Les expériences ont été réalisées au laboratoire de microbiologie des sols de l'INRA à Dijon (France). L'échantillon de sol (25g) placé dans un bocal est saturé avec une solution de KNO_3 à 100 mg de N l^{-1} (25ml) et placé en anaérobiose sous atmosphère d'azote. Ce traitement, tout en réalisant les conditions d'anoxie, rend le milieu suffisamment riche en nitrates. L'incubation a lieu ensuite sous une température de 20°C (température favorable à la dénitrification).

Deux séries d'incubations sont réalisées par échantillon : (1) avec apport d'acétylène (2,5 % C_2H_2) pour mesurer l'activité potentielle de dénitrification, (2) sans addition d'acétylène pour mesurer la production et l'accumulation éventuelle de N_2O pendant la dénitrification. La production d'ammonium à partir des nitrates est considérée comme faible dans ces conditions (Nommik, 1956 ; Hénault et al., 2001).

Le gaz est prélevé dans des vénojects à l'aide d'aiguille après 0h, 48h, 71h, 143h, 190h, 237h et, 334 heures d'incubation, puis dosé automatiquement par le Varian 34 000CxGC équipé

d'un détecteur à capteurs d'électrons couplé à un système de prélèvement automatique HSS 86-20 SRA Instrument.

L'utilisation de l'acétylène (sans vapeur d'acétone) inhibe seulement la réduction de N_2O en N_2 , sans altérer la vitesse des autres réactions de la chaîne de réduction des nitrates (Yoshinari et Knowles, 1976 ; Balderston et al., 1976). Cependant, l'expérience ne doit pas trop durer (quelques jours) au risque d'assister à un métabolisme de l'acétylène par la microflore du sol, avec pour conséquence une éventuelle accélération de la dénitrification (Germon, 1980).

8.3 - Résultats

8.3.1 - Effets des pratiques culturales

Les résultats (annexes 17₁ et 17_{1suite1}) sont synthétisés dans les figures 21 et 22. Les figures avec acétylène (C_2H_2) (à gauche) représentent les cinétiques de dénitrification potentielle et les autres (à droite) les productions de N_2O .

Sols sous monoculture de sorgho:

La figure 21 présente les résultats obtenus sur ces sols.

La dénitrification potentielle est identique à la production de N_2O . Les quantités de N_2O enregistrées sont de 28, 28 et 31 $\mu g\ N-N_2O\ g^{-1}\ sol\ sec$ au bout de 334 heures d'incubation respectivement pour le traitement te, fm et fmo, montrant une absence d'effet des traitements. La respiration est faible, environ $20\ 10^{-3}\ mg\ C\ g^{-1}\ sol$ en 200 heures soit $0.1\ 10^{-3}\ mg\ C\ g^{-1}\ sol\ h^{-1}$ ou $2.4\ mg\ C\ kg^{-1}\ sol\ j^{-1}$ (annexe 17₂).

Sols sous rotation sorgho-niébé :

La figure 22 présente les résultats obtenus sur ces sols.

La dénitrification potentielle n'est pas identique à la production de N_2O : fort potentiel de dénitrification, et faible production de N_2O pour te et fmo ; faible potentiel de dénitrification et forte production de N_2O pour fm. Les quantités de N_2O enregistrées en 334 heures d'incubation sont de 15, 24 et 32 $\mu g\ N-N_2O\ g^{-1}\ sol\ sec$ respectivement pour le traitement te, fm et fmo. On enregistre donc un effet du fumier sur la dénitrification et la production de N_2O . La respiration du sol, toujours faible (environ $30\ 10^{-3}\ mg\ C\ g^{-1}\ sol$, annexe 17₂) est globalement plus importante sous rotation sorgho-niébé que sous monoculture de sorgho, ce qui témoigne d'une activité microbiologique plus importante sous rotation que sous une monoculture de sorgho.

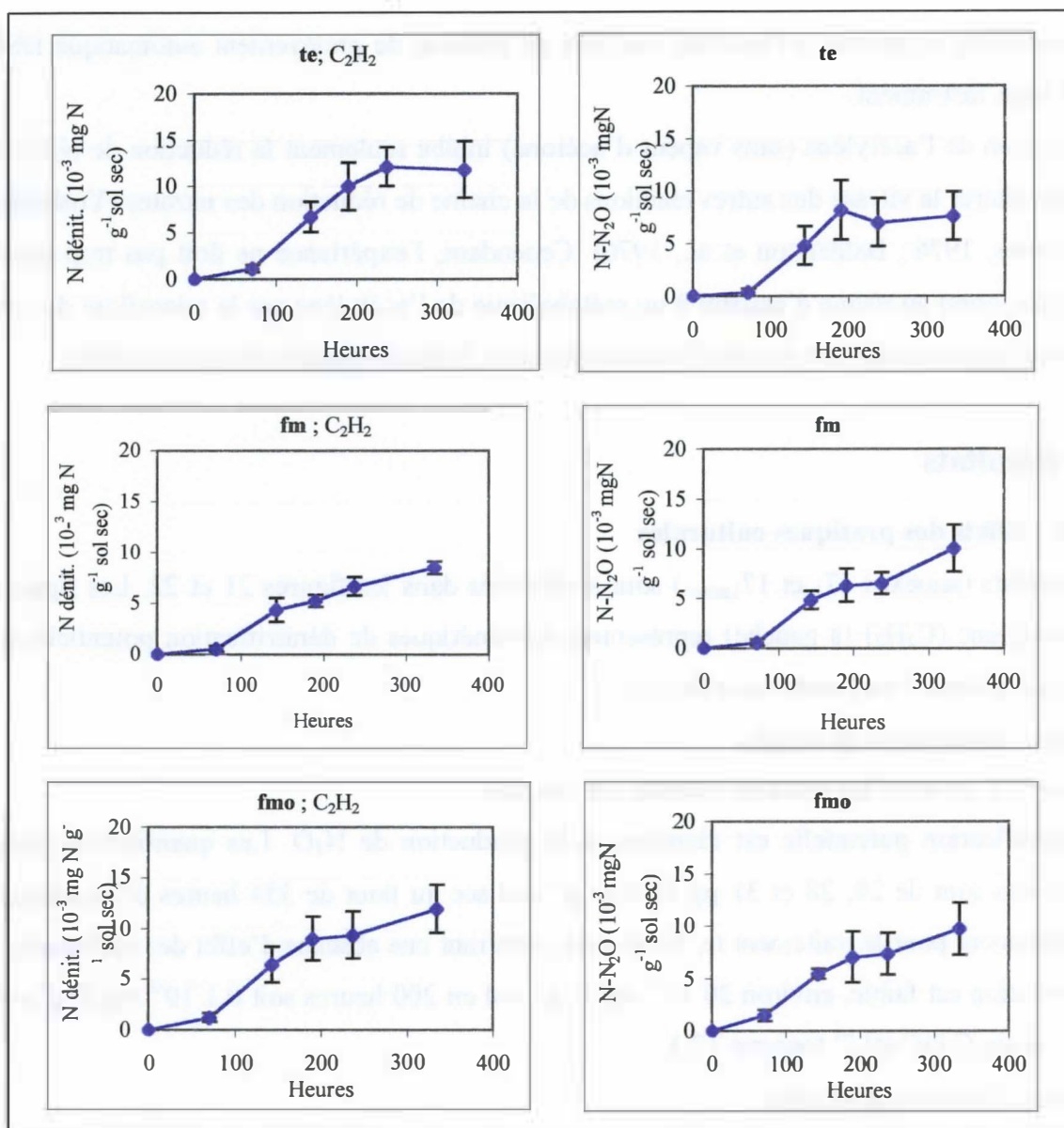


Figure 21 : Cinétiques de dénitrification potentielle et production de N_2O de trois sols de l'essai longue durée, Saria ; monoculture de sorgho.
 Fig. à gauche : dénitrification potentielle ;
 Fig. à droite : production de N_2O ;
 Les barres indiquent l'écartype de la moyenne.

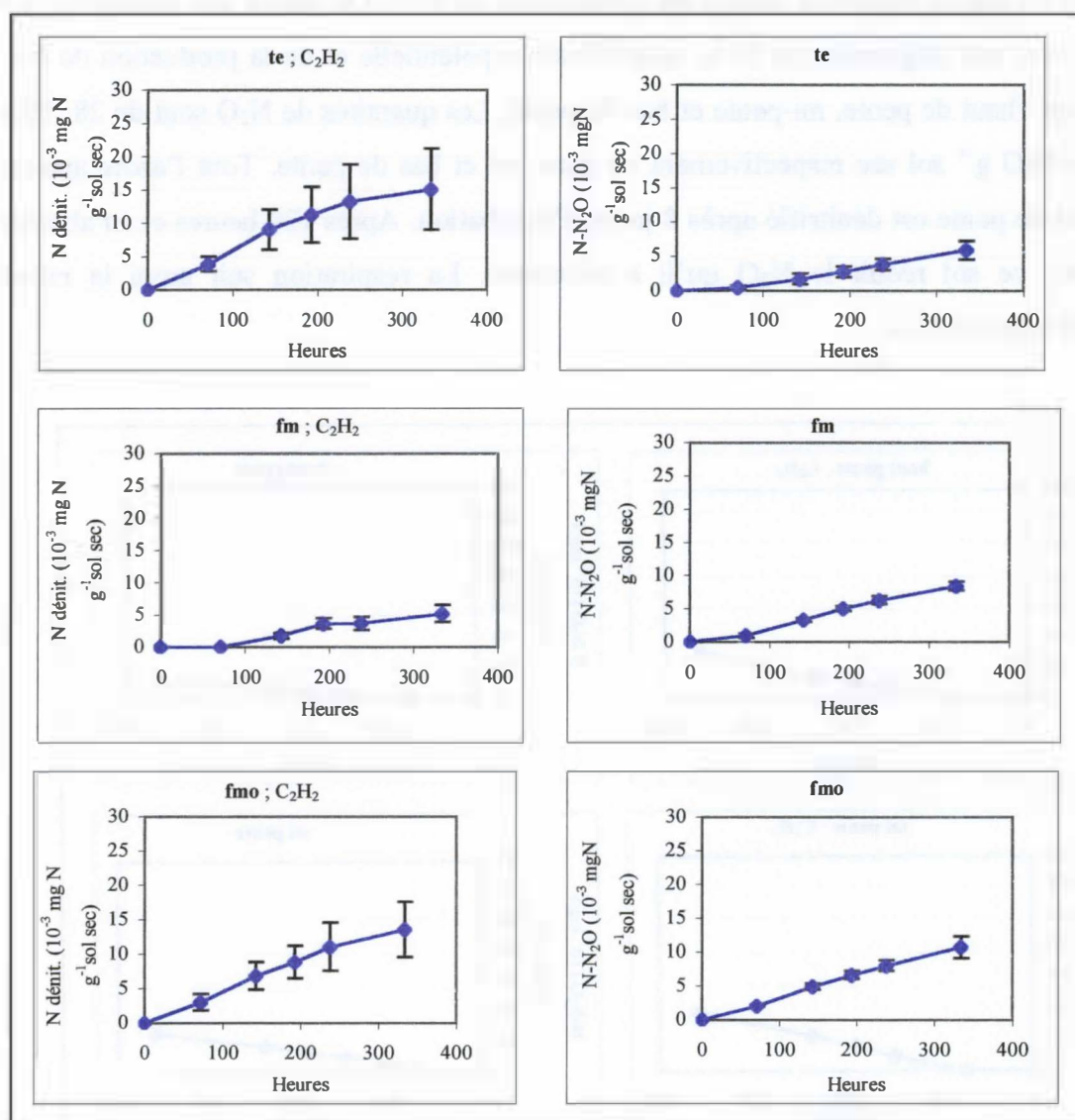


Figure 22 : Cinétiques de dénitrification potentielle et production de N_2O de trois sols de l'essai longue durée, Saria. Rotation sorgho/niébé
 Fig. à gauche : dénitrification potentielle ;
 Fig. à droite : production de N_2O ;
 Les barres indiquent l'écartype de la moyenne.

8.3.2 - Effets de la toposéquence

Les résultats (annexe 17_{suite2}) sont illustrés par la figure 23. Rappelons que les graphiques avec acétylène (C_2H_2) représentent les cinétiques de dénitrification potentielle (figures à gauche) et les autres (figures à droite) les productions de N_2O . On relève une graduation des réponses avec une augmentation de la dénitrification potentielle et de la production de N_2O dans l'ordre : haut de pente, mi-pente et bas de pente. Les quantités de N_2O sont de 28, 70 et 285 μg N- N_2O g^{-1} sol sec respectivement en haut, mi et bas de pente. Tout l'azote apporté dans le bas de pente est dénitrifié après 8 jours d'incubation. Après 120 heures et en absence d'acétylène, ce sol réduit le N_2O qu'il a accumulé. La respiration suit aussi la même graduation (annexe 17₂).

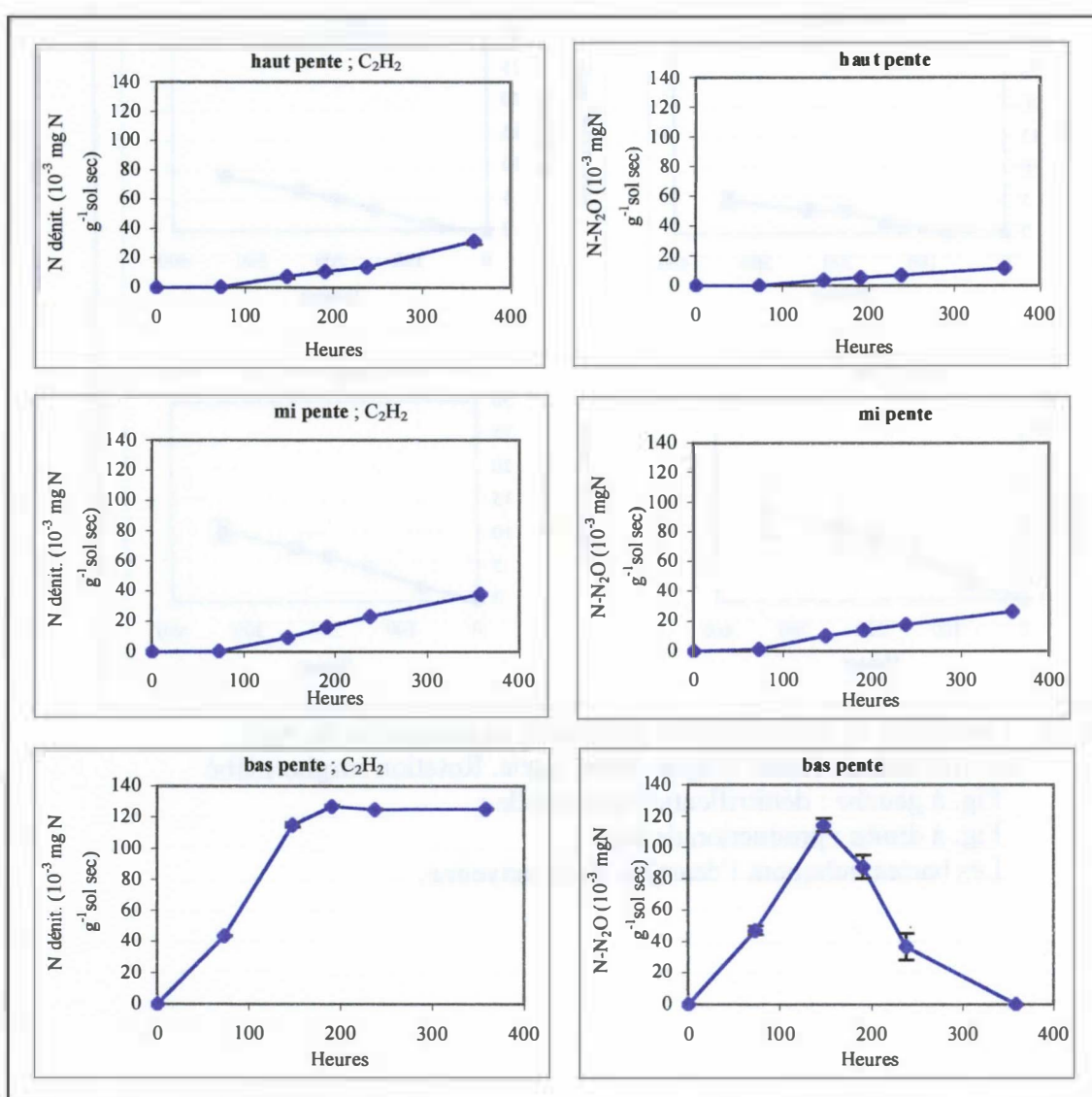


Figure 23 : Cinétique de dénitrification potentielle et production de N_2O dans des sols de haut, mi et bas de toposéquence
 Fig. à gauche : dénitrification potentielle ;
 Fig. à droite : production de N_2O ;
 Les barres indiquent l'écartype de la moyenne

8.3.3 - Effets de la localisation du champ

Les résultats obtenus (annexe 17_{suite3} et fig. 24) indiquent que les sols des champs de case dénitrifient plus que ceux des champs de brousse, mais ne produisent pas plus de N_2O . En effet, la production de N_2O dans les champs de brousse est de $28 \mu g N-N_2O g^{-1} \text{ sol sec}$ en 334 heures d'incubation contre 13 pour les champs de case. La respiration est semblable dans les deux sols (annexe 17₂).

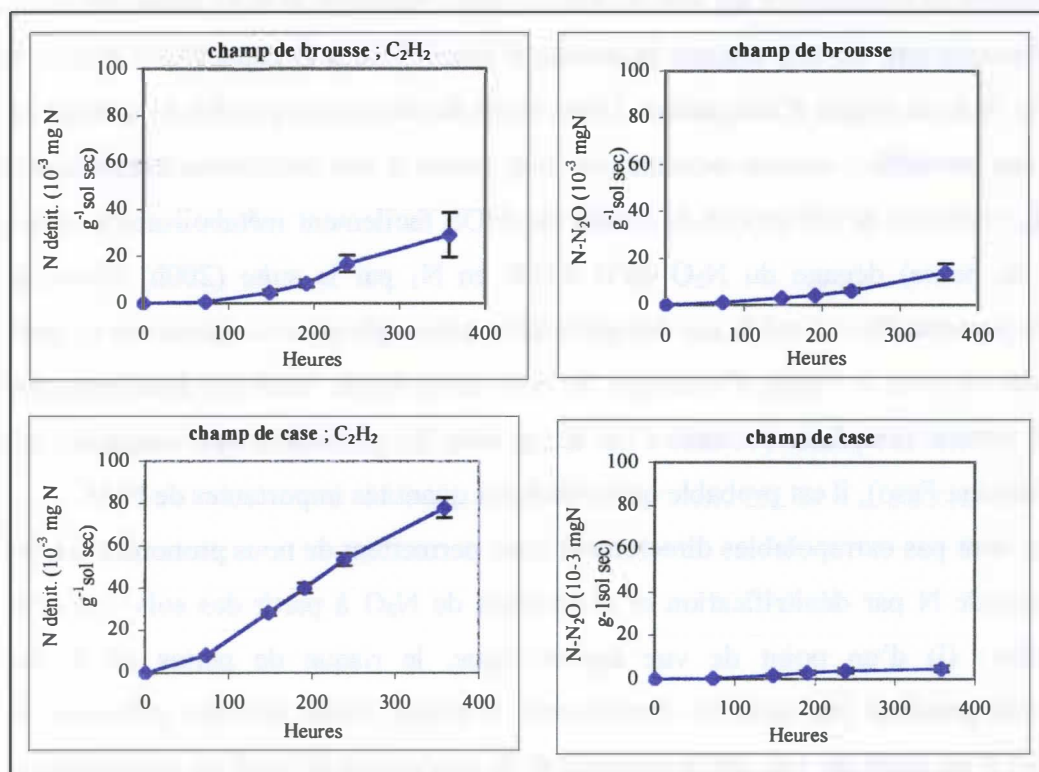


Figure 24 : Cinétique de dénitrification potentielle et production de N_2O dans des sols de champ de case et de brousse
Fig. à gauche : dénitrification potentielle ;
Fig. à droite : production de N_2O ;
Les barres indiquent l'écartype de la moyenne

8.4 - Discussion

Notre étude a porté sur des échantillons de sols broyés et séchés (humidité < 1 %). La lente dénitrification observée est vraisemblablement due au fait que l'état de dessiccation des sols a nécessité un temps de latence avant le démarrage de l'activité biologique.

De cette étude il ressort que :

- (i) tous les sols étudiés sont potentiellement capables de dénitrifier et de produire du N_2O . La production de N_2O est souvent similaire à la dénitrification ce qui signifie que ces sols, lorsqu'ils dénitrifient, dégagent des quantités importantes de N_2O ;
- (ii) les pratiques culturales ont une influence sur la dénitrification potentielle et la production de N_2O : la fumure organique (fumier) accroît la dénitrification et la production du N_2O (dans

le cas présent il s'agit d'un arrière effet du fumier, donc, en effet direct, on peut faire l'hypothèse d'une production de N_2O encore accrue) ; notons l'absence d'effet du système de culture (monoculture de sorgho ou rotation avec une légumineuse) ainsi que de la fertilisation et la localisation du champ (qui se résume principalement à un effet fertilisation) sur le potentiel de dénitrification et sur la production de N_2O des sols.

(iii) notons l'effet de la toposéquence qui joue sur la dénitrification potentielle ainsi que la production de N_2O qui augmentent du haut vers le bas de pente ; cependant, si les conditions de la dénitrification se poursuivent les sols de bas de pente réduisent le N_2O accumulé en N_2 après 120 h d'incubation. Ce sol, comme beaucoup d'autres sols, a la capacité de réduire le N_2O mais il lui faut un temps d'adaptation. Cette étude *in vitro* nous permet de simuler un processus *in situ* probable : soumis pendant un long temps à des conditions dénitrifiantes (hydromorphie, présence de nitrates et de source de MOS facilement métabolisable), ce sol (type sol bas de pente) dégage du N_2O qu'il réduit en N_2 par la suite (200h) (Germon, communication personnelle) ; c'est le cas des périmètres aménagés pour la riziculture irriguée au Burkina Faso où donc le risque d'émission de N_2O serait faible. Mais s'il fonctionne par pulses selon le rythme des pluies (comme c'est le cas dans les périmètres non aménagés des bas fonds au Burkina Faso), il est probable qu'il émet des quantités importantes de N_2O .

Ces données ne sont pas extrapolables directement mais permettent de nous prononcer sur les risques de pertes de N par dénitrification et d'émission de N_2O à partir des sols que nous venons d'étudier : (i) d'un point de vue agronomique, le risque de pertes de N par dénitrification est grand et par voie de conséquence le risque d'une moindre efficacité de l'engrais N ; (ii) d'un point de vue environnemental, la production de N_2O est importante et ce d'autant plus qu'il s'agit de sols de bas de pente, sauf que pour ces derniers sols précisément, une rémanence des conditions de la dénitrification entraîne une réduction de N_2O en N_2 . Ces hypothèses restent à vérifier par des mesures sur des sols non remaniés et des mesures *in situ*.

8.5 – Conclusion

Bien que ne permettant pas d'aboutir à des résultats quantifiés d'émission de N_2O par le sol, cette étude fait néanmoins ressortir le risque d'émission de N_2O du sol en conditions pluviales. Elle confirme également l'hypothèse émise au paragraphe 5.4 sur les pertes de N par dénitrification dans les sols avec fumier.

L'intérêt de cette méthode est de fournir un indicateur de potentialité de dénitrification et d'émission de N_2O liée à la nature du sol et à son état de fertilité induit par les pratiques culturales. Ces tests *in vitro* sont un préalable nécessaire pour orienter les études sur la dénitrification et la production de N_2O *in situ* ou sur des échantillons de sol non remaniés. Ces

études sont nécessaires même dans l'hypothèse d'une dénitrification marginale car selon Van Cleemput (1998) les conditions où la dénitrification est marginale sont souvent plus favorables à la formation de N_2O que de N_2 ; elles sont nécessaires sur les sols de bas-fonds et de rizières (aménagés ou non) qui serviront de supports dans le cadre de projets d'intensification de la production rizicole dans les bas-fonds ; pour le Burkina Faso, ces projets concernent une surface d'environ 160 000 ha (Sedogo et al., 2001).

Il semble nécessaire pour les études futures de suivre l'ensemble de la chaîne de réduction des nitrates, notamment la production de NO qui pourrait être importante pendant les périodes où l'humidité des sols descend en dessous de leur capacité au champ (Verchot, 2002), conditions probables vu la mauvaise répartition spatio-temporelle de la pluviométrie dans la zone centre du Burkina Faso dont les figures 3 et 6 sont une illustration.

9 - DISCUSSION GENERALE

9 – DISCUSSION GENERALE

1 - Enjeu et limite du bilan d'azote

La connaissance du bilan de N, comme nous l'avons vu, permet de porter un jugement sur l'évolution de la fertilité azotée du sol : fertilité en voie d'amélioration ou en voie de dégradation, et de quantifier globalement les pertes. Cependant la méthode de calcul utilisée dans la thèse connaît certaines limites qui restreignent la validité de ce raisonnement, des améliorations de méthode sont alors nécessaires : (i) obtenir une valeur moyenne des flux du cycle de l'azote (inputs ou outputs) sur la période considérée et non pas s'en tenir simplement à un ou quelques résultats annuels souvent conditionnés, comme on le sait, par la pluviométrie, (ii) le changement d'échelle : le bilan doit être raisonné à plusieurs niveaux d'échelle, par exemple parcelle, exploitation et terroir. Ces difficultés pourraient être en grande partie levées par la modélisation des flux majeurs du cycle de l'azote (Nex, NI, NFix) et par la modélisation intégrant les variabilités spatio-temporelles des flux et leurs déterminants agro-socio-économiques (voir paragraphe 10).

Les résultats obtenus sur les flux, les compartiments et les transferts internes du cycle de l'azote peuvent se replacer dans un modèle global de fonctionnement de l'agrosystème (figures 25)

2 - Maîtriser les pertes d'azote

Maîtriser les pertes au niveau de la parcelle est un impératif agronomique et environnemental. L'impératif agronomique, c'est d'optimiser l'économie de N au sein de l'exploitation et plus particulièrement d'accroître l'efficacité de l'engrais azoté, ce qui impose la réduction des pertes de N. L'impératif environnemental, c'est la réduction des pertes de N par voie gazeuse et principalement celles sous forme de N_2O , et la réduction des pertes de N par lixiviation de NO_3^- .

Dans cette étude sur les pertes de N, nous avons adopté une démarche qui consiste d'abord à quantifier globalement les pertes puis à étudier les processus majeurs à l'origine de celles-ci, lixiviation, volatilisation et dénitrification et leurs principaux déterminants.

Pertes globales d'azote

La mesure des pertes globales est fondée sur la méthode des bilans appliquée à un essai « longue durée » : l'essai de Saria. Cette approche nous a permis de mesurer dans le temps et sur de longues périodes, l'effet des pratiques culturales les plus répandues : monoculture ou rotation, fertilisation minérale : nulle, faible ou forte, avec ou sans amendement calcique ou organique. Dans la zone écologique de Saria et dans le cas des pratiques culturales couramment adoptées, il ressort nettement que la fertilisation minérale acidifie le sol et accroît

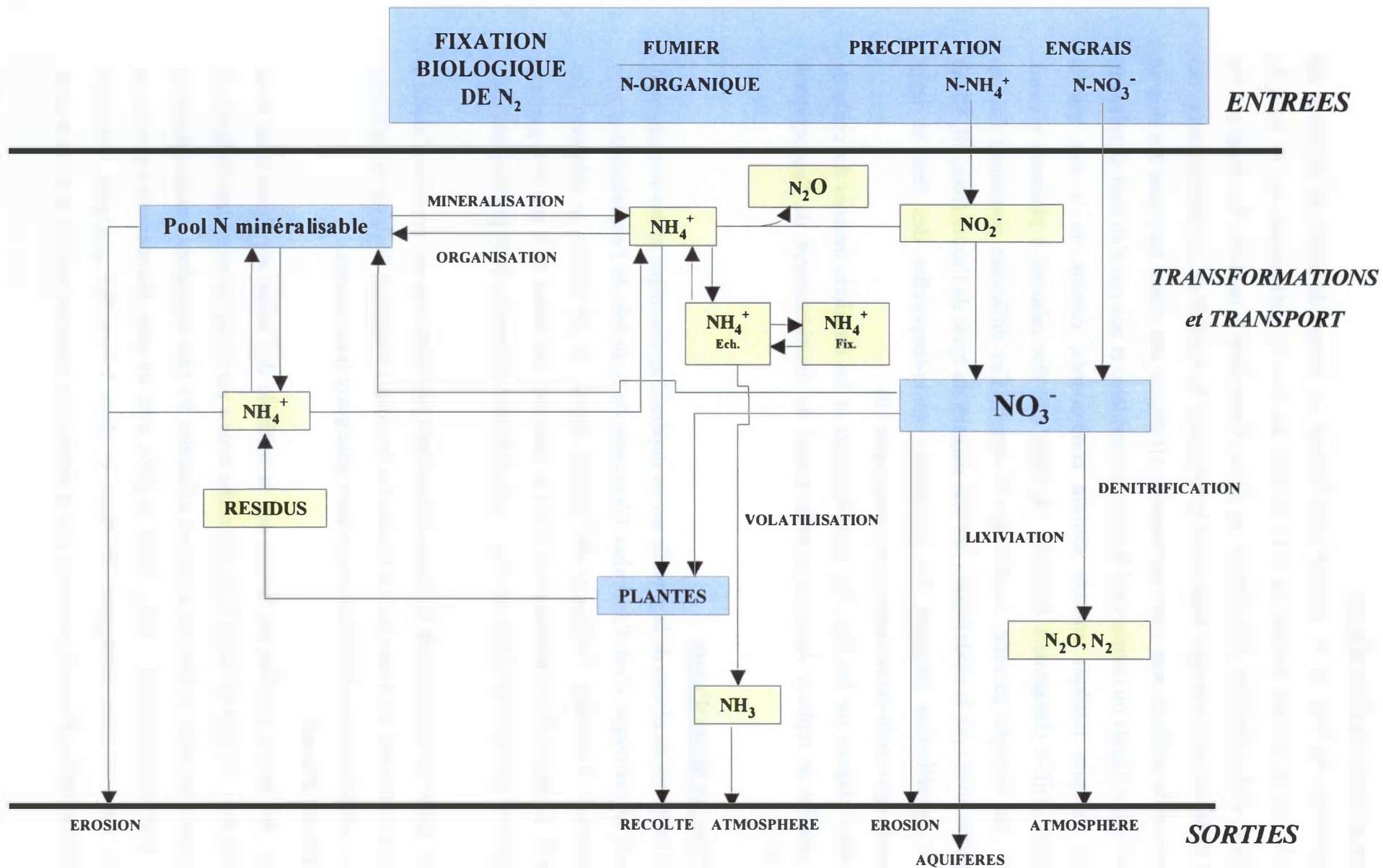


Figure 25 : Cycle de l'azote et fonctionnement du système sol-plante en milieu cultivé (inspiré de Keeney, 1986).

les pertes en N, mais que le chaulage ou l'apport de matière organique préhumifiée (fumier) permet de stopper la dégradation du sol et les pertes, et de restaurer la fertilité du sol ; en revanche, ces deux pratiques conjuguées activent la dégradation de la fertilité azotée du sol et accroissent les pertes jusqu'à près de $70 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ vraisemblablement par dénitrification. La nécessité d'apporter de la matière organique pour maintenir l'équilibre du bilan de N a été déjà montrée par une approche similaire par Wetselaar (1967) et par Sedogo (1993). Ce premier auteur, en Australie, a comparé le bilan N obtenu sous légumineuses et sous jachère après 4 années. Les résultats de cette expérimentation ont mis en évidence clairement que dans les conditions où aucune partie aérienne de la plante ne retourne dans le sol directement ou via les animaux (fumure organique), la teneur en N dans le sol baisse au cours de la culture. Le résultat positif de l'effet du chaulage sur la remontée du N_{tot} sol est, quant à lui, singulier et mérite qu'on le souligne ; il avait déjà été mis en évidence par Sedogo (1993). Cet auteur avait trouvé pour la zone de Saria : (i) que l'engrais azoté induit une forte dégradation de la fertilité du sol ; (ii) que pour prévenir cette dégradation, la fertilisation N doit être associée au chaulage dont cet auteur a analysé le mécanisme d'action et montré notamment que le chaulage n'agit que sur les 20 ou 30 premiers cm du profil et que son action est limitée dans le temps (6 à 8 ans) ; (iii) mais que seul l'amendement organique permet de régénérer l'ensemble du profil.

Pertes d'azote par lixiviation

On sait que la lixiviation, parce que portant essentiellement sur les nitrates, dépend des facteurs majeurs de la nitrification, de la pluviométrie (nature et importance des pluies), de la texture et de la structure du sol, et enfin du système racinaire des plantes (Wetselaar, 1967). On distingue deux types de lixiviations : (1) la lixiviation dans les horizons peu profonds où l'on considère que les pertes sont faibles à nulles dans le cas des cultures céréalières ayant un système racinaire capable d'atteindre le N-NO_3^- lixiviés comme le mil ou le sorgho ; dans ce cas, les pertes de N par lixiviation sont considérées comme négligeables ; (2) la lixiviation dans les horizons plus profonds hors du profil d'exploration racinaire : c'est la « vraie lixiviation », prise en compte dans notre étude. Dans la zone écologique de Saria (isohyète 850 mm), nous avons mesuré sous sorgho, par la méthode du bilan hydrique, une lixiviation à 90 cm de profondeur, de 6 à $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Dans la zone écologique de Thiougou (isohyète 950 mm), par la même méthode, Oliver et al (1998) sous sorgho ont mesuré une lixiviation de N variant de 10 à $37 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ de haut en bas de toposéquence, avec les valeurs les plus fortes pour les champs de case pouvant bénéficier d'une fertilisation abondante

Influence de l'interaction climat / minéralisation de N

Dans les zones arides et semi-arides, en début de chaque saison des pluies, tout le N facilement minéralisable du sol est minéralisé puis activement nitrifié. En sol sableux, ce N

nitrifié est lixivié 2 à 3 semaines après le début de la saison des pluies (Blondel, 1972) mais est potentiellement « récupérable » par les plantes (Waneukem, 1995) ; ensuite, les pertes par lixiviation deviennent moins importantes voire négligeables sous céréales. Nos résultats montrent, à Saria, qu'à la nitrification nette la plus élevée ($60 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) correspond la lixiviation la plus élevée ($10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$).

Influence de la végétation

On sait que les cultures présentent des capacités différentes d'extraction de NO_3^- dans les horizons de surface, et des systèmes racinaire différents. L'enracinement par sa cinétique d'installation et sa profondeur maximale, est un facteur déterminant de la lixiviation. Les céréales traditionnelles telles que mil et sorgho présentent un énorme avantage par rapport à d'autres cultures (arachide, maïs, cotonnier) dont l'enracinement n'a pas la même puissance. Au Sénégal (isohyète 600 mm), Pieri (1992) a montré, par la méthode du bilan hydrique, que la lixiviation est inférieure à $1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ sous mil, mais peut atteindre $25 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ sous arachide. Même parmi les légumineuses, des différences sont observées : d'après Wetselaar (1967), la quantité accumulée est plus importante après arachide (10 à 20 mg kg^{-1} de N-NO_3^- dans l'horizon 0-100 cm) qu'après une autre légumineuse, comme par exemple après *Stylosanthes*, où la teneur en N-NO_3^- dans le sol est très faible (5 mg kg^{-1}).

Pertes d'azote par érosion et ruissellement

Nos bilans N ont été réalisés dans une zone de topographie plane, donc avec un risque minime d'érosion et de ruissellement, nous autorisant à admettre pour Saria des pertes de N nulles par érosion et ruissellement. Cette situation est cependant peu fréquente et l'existence d'une pente, même faible, est souvent observée. C'est la raison pour laquelle il nous est apparu nécessaire de faire le point sur ce processus.

Les deux principaux facteurs de l'érosion en zone tropicale, après la topographie, sont la pluviométrie ($> 900 \text{ mm}$) et la couverture végétale. L'érosion est intense surtout en début de saison des pluies où la végétation n'est pas suffisamment développée pour protéger le sol et absorber l'énergie cinétique des pluies pendant la saison des pluies. L'érosion peut être intense aussi dans le cas de faible développement végétatif de la plante où elle peut déplacer $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ de sol (Charreau et Nicou, 1971), soit environ $3.5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ avec $\text{N}_{\text{tot sol}}$ de 0.07 %. L'inadaptation des pratiques culturales est souvent un facteur aggravant de l'érosion du sol. Sur la base d'une division des formations végétales en 4 catégories : les forêts, les jachères herbeuses, les cultures, et les sols nus, et des mesures d'érosions faites par Charreau et Nicou (1971), Wetselaar et Ganry (1982) ont estimé les quantités de N érodée (tableau 20).

Tableau 20 : Estimation des pertes de N par érosion en fonction du couvert végétal à la Station agronomique de Séfa au Sénégal (Wetselaar et Ganry, 1982).

Couverture plante	Erosion (kg N ha ⁻¹)		
	Minimum	Maximum	Moyenne
Forêt	traces	< 1	< 1
Jachère	2	10	5
Cultures	2	19	7
Sol nu	6	54	21

(1) on fait l'hypothèse d'une teneur N_{tot} sol ca. 0.1 %

La dénitrification et le risque d'émission de N₂O

On sait que la dénitrification est une cause majeure des pertes de N dans les agrosystèmes tropicaux pour deux raisons (Wetselaar et Ganry, 1982). Premièrement, les pluies abondantes et intenses induisent temporairement une anaérobiose dans les sols, celle-ci est accentuée paradoxalement en sols sableux ; en effet, beaucoup de sols de la zone semi-aride sont précisément sans structure et sans agrégat argilo-humique et sont de ce fait rapidement saturés en eau. Deuxièmement, les températures élevées en zone de faible altitude stimulent la dénitrification du fait que la réaction est fortement liée à la température. Ces conditions étant fréquentes, on admet facilement que les deux variables pertinentes de la dénitrification sont l'accumulation de N-NO₃⁻ et la présence d'une source de carbone dans le sol.

Le problème majeur posé par l'estimation de la dénitrification à l'échelle de la parcelle est l'impossibilité de mesurer les pertes gazeuses directement dans les conditions représentatives du champ. Cependant, diverses méthodes d'estimations indirectes peuvent être appliquées (Cellier et al., 1996). La méthode fondée sur le calcul du « terme résiduel d'un bilan de N au champ » est celle que nous avons adoptée, complétée par des mesures *in vitro* de la dénitrification potentielle. Les estimations faites à Saria tendent à montrer des pertes importantes attribuées à la dénitrification seulement sur le traitement avec fumier après chaulage, résultat étayé par l'étude *in vitro* qui montre que le risque d'émission de N₂O est accru par l'apport du fumier et ce d'autant plus que la teneur en argile est élevée.

Nos résultats sur les vitesses de nitrification au champ mettent en évidence un risque de dénitrification dans le sol hors influence du système racinaire tout au long du cycle (nitrification nette négative mise en évidence dans les cylindres *in situ* et attribuée à la dénitrification). Mais cette situation a d'autant moins de risque de se produire que le système racinaire est développé. En revanche, il apparaît nettement une accumulation de N-NO₃⁻ en fin de cycle cultural entraînant un risque élevé de dénitrification (paragraphe 3.4).

3 – Accroître l'efficacité de l'azote engrais

L'efficacité, appelée encore productivité de l'unité de N engrais, est définie comme l'accroissement de MS totale dû à l'engrais par kg de N engrais apporté.

L'efficacité de N engrais pour une culture donnée est conditionnée par deux facteurs majeurs : les pertes de N engrais et la fourniture de N par le sol à la plante.

Raisonner le bilan de l'azote engrais dans le système sol-plante

Le traceur isotopique ^{15}N dans le système sol-plante nous a permis de quantifier les valeurs NdfF et NdfS sur le maïs et sur le sorgho.

Sur maïs, on a obtenu un gradient NdfS % de 40, 70 et 73 % respectivement pour les champs de brousse, champs intermédiaires et les champs de case, lié à une efficacité croissante de N engrais respectivement de 40, 42 et 45%. Ces résultats suggèrent une relation entre la fourniture de N par le sol à la plante et l'efficacité de N engrais et par voie de conséquence ils attestent de l'importance du pool N minéralisable du sol (Nd) sur l'efficacité de N engrais (alors qu'on aurait pu s'attendre à l'inverse, à savoir que la plante réponde d'autant plus à l'engrais N que la sol est appauvri en N). Sur sorgho, on met en évidence aussi un NdfS % > 50 % dans les parcelles fertilisées (NdfS % = 60 %) ; de plus, la mesure de NiS sur 0 – 80 cm de profondeur nous permet de calculer par déduction (défaut de bilan) les pertes de N engrais, de 31 % sans fumier et 37 % avec fumier.

Ces résultats vont dans le sens de ceux de Ganry (1990) et Badiane (1993) sur mil, et de Sedogo (1993) sur sorgho obtenus en station en les validant par une approche spatiale en milieu paysan jusqu'à présent jamais réalisée. Ils confirment d'une part la contribution majeure du sol dans l'alimentation azotée de la céréale (NdfS% > 50%) associée à une efficacité de N engrais élevée et confirment d'autre part l'importance des pertes globales de N engrais apporté, au moins égales à 30 % (dans l'atmosphère et dans le sol au delà de 80 cm de profondeur).

La mise en oeuvre d'une fertilisation efficace et économe nécessite la connaissance des trois variables NdfF, NdfS et NiS et au minimum des deux premières. En raison de la difficulté d'une mesure directe de NdfF et NdfS, nous avons procédé par voie statistique à une simulation de ces variables basée sur des indicateurs facilement mesurables, en particulier le rendement en N du témoin ($N_{\text{tot plante}T_0}$) et le coefficient apparent d'utilisation de N engrais (CAU). Pour la zone écologique de Thiougou et pour le maïs, on obtient deux relations fortes : $NdfS = f(N_{\text{tot plante}T_0})$ et $NdfF = f(N_{\text{tot plante}T_0}, \text{CAU}\%)$; le $N_{\text{tot plante}T_0}$ du maïs est lui-même fonction de la teneur en N-NH_4^+ et en Kéch du sol avant culture. Toujours à Thiougou, l'étude statistique fait aussi ressortir trois groupes de champs correspondant effectivement à une réalité géographique : les champs de brousse très peu fertiles, les champs de case fertiles, et les champs intermédiaires peu fertiles, la prise en compte de ces groupes

permettant d'affiner la précision des régressions. Ces résultats présentent un intérêt pour la vulgarisation : ils montrent le besoin d'une fertilisation N starter et d'une fertilisation K pour le maïs dans les champs de case.

Hypothèses sur l'origine des pertes d'azote engrais

La volatilisation est le premier risque de pertes de N engrais jusqu'à 30 % de N apporté (60 N) lorsque l'urée est utilisée. Elle est inversement proportionnelle à la teneur en argile du sol. Le moyen le plus efficace de l'empêcher est l'enfouissement de l'urée dans le sol. Une cartographie de la teneur en argile des sols permettrait de signaler les zones à risque.

La dénitrification dans les sols ferrugineux tropicaux de la zone écologique du Plateau central du Burkina Faso est potentiellement forte. Le risque de pertes de N engrais par dénitrification existe donc dans toutes les situations où la nitrification nette du sol (l'offre en N du sol) est en excès par rapport à la demande de la plante. Le moyen le plus efficace pour limiter ce risque est d'adapter la demande de la plante à l'offre par sol. Malgré tout, même dans le cas favorable d'un synchronisme, nos résultats montrent qu'il peut subsister un excès de N-NO_3^- dans le sol en fin de cycle cultural auquel cas une culture relais, telle que le niébé, doit être recommandée.

La lixiviation à 90 cm de profondeur ne dépasse pas 7.5 % de N engrais apporté (60 N) ; elle est négligeable en présence de fumier. La littérature fournit très peu de références sur la lixiviation de N engrais en zone aride et semi-aride. Chabalier (1980), en Cote d'Ivoire (isohyète 1200 mm) trouve sous maïs recevant 60 et 120 N, respectivement 3 et 5 % de N engrais lixivié. Du fait de ce peu de références, afin d'évaluer l'importance du phénomène lixiviation de N engrais, au moins en zone semi-aride africaine, nous admettrons que l'immobilisation de N engrais (N_{is}) dans l'horizon 40-80 cm (horizon le plus profond fréquemment prélevé et analysé) est un indicateur de la lixiviation de N engrais en profondeur. Nous comparerons les résultats du Burkina Faso, du Sénégal et du Cameroun. Au Burkina Faso : (i) à Saria, sous sorgho recevant 60 N (isohyète 850 mm), le N_{is} « 40-80 cm » ne dépasse pas 5 % sur fm ; (ii) à Sidéradougu au Sud-ouest Burkina, sous maïs recevant 60 N (isohyète 1200 mm), Waneukem (1995) trouve 11 % dans 40-80 cm et 8 % dans 80-120 cm ; la supériorité des valeurs de Sidéradougu sur celles de Saria s'explique par une pluviométrie supérieure et vraisemblablement par le fait qu'il s'agit d'une culture de maïs dont l'enracinement est moins puissant que celui du sorgho. Au Sénégal, sous mil recevant 90 N (isohyète 600 mm) et sous maïs recevant 100 N (isohyète 900 mm), toujours dans l'horizon 40-80 cm, Ganry (1990) trouve un N_{is} sous mil de 6 % et sous maïs de 6 % également. Au Cameroun, sous sorgho recevant 100 N (isohyète 800 mm), Gigou (1982) trouve un N_{is} de 5 %.

Recommandations pratiques

Toute technique d'accroissement de l'efficacité de l'engrais N devra viser à la fois l'accroissement du pool N minéralisable du sol (Nd) et la réduction des pertes de N engrais. Pour ce faire, on suggère trois axes d'intervention : (1) accroître Nd, ce qui est possible en favorisant la fixation réelle de N_2 (FRN) de la légumineuse dont le niveau est faible ; en effet, nous avons trouvé une FRN du niébé de 40 % dont il importe de déterminer les causes de ce faible niveau ; (2) en raison de l'effet négatif du chaulage en présence de fumier sur l'augmentation des pertes, il importe de reconsidérer les modalités du chaulage (doses et fréquence) ; (3) enfouir l'urée en sachant que cela est d'autant plus impérieux que la teneur en argile est faible.

10 - PERSPECTIVES

10 - PERSPECTIVES

La modélisation, un outil à développer

Nous avons vu que l'établissement du bilan N connaît certaines limites. La modélisation pourrait précisément lever ces limites. Nos connaissances actuelles sur le déterminisme des principaux flux et nos observations militent en faveur de l'hypothèse que *dans un système donné, pour une même modalité de pratiques culturales et un même niveau d'intensification, la première cause de variation des flux majeurs du cycle de N (N_{ex} , N_{Fix} , N_I et N_g) est la pluviométrie et le drainage qui en résulte*, et par voie de conséquence milite en faveur d'une modélisation fondée principalement sur la simulation du bilan hydrique et du drainage qui permet, en fonction du niveau d'intensification, la prévision du rendement (Franquin et Forest, 1977 ; Forest et Cortier, 1990 ; Baron et al., 1996). Pour simuler le rendement, il faut déterminer la date de semis optimale (d.s.o.) définie comme celle qui permet d'obtenir, avec une probabilité maximum pour une culture donnée et une conjonction de facteurs pédo-climatiques donnés dont le synchronisme offre/demande, la production "utile" la plus élevée possible ; elle est déterminée à partir d'une réserve en eau utile dans le sol (R.U.) suffisante. Par exemple, on sait que pour les sols sableux de la zone soudano-sahélienne, cette R.U. correspond à au moins 30 mm de pluie dans la période de 5 jours précédant le semis (Cortier, 1994). On peut, à partir de cette date (d.s.o.), sur des séries pluviométriques de longue durée (1 à plusieurs décennies) avec une probabilité définie (de 80 % par exemple) simuler et prévoir :

- (1) le drainage vertical et par voie de conséquence la lixiviation à une profondeur donnée si l'on connaît la teneur en N minéral de la solution du sol à cette profondeur (ce dernier paramètre serait à préciser) ;
- (2) le rendement probable pour un niveau d'intensification donnée. Partant de la connaissance de ces éléments de rendement, si l'on connaît la teneur en N total de principaux organes, on peut simuler le N_{ex} ;
- (3) les pertes dans l'atmosphère (N_g) par déduction.

Approche spatiale du bilan de N

L'approche spatiale du bilan de N devrait être réalisée en intégrant dans un modèle tous les facteurs pouvant influencer la gestion des éléments minéraux à chaque niveau d'échelle, fonction principalement (i) des facteurs biophysiques (types de sols, érosion, pluviométrie), (ii) des facteurs liés aux pratiques de l'agriculteur (techniques culturales, gestion des résidus de récolte, fertilisation et fumure, aménagements anti-érosifs), (iii) des facteurs socio-économique (flux des facteurs de production). Avec un tel outil, l'établissement des bilans minéraux peut être porté à un niveau d'échelle supérieur tel que le terroir, la région et le pays, et servir alors d'outil d'aide à la décision. Les modèles NUTMON déjà développés par

Smaling et Fresco (1993), Smaling et al. (1993), et Stoorvogel et al. (1993) et les modèles NUTSHELL mis au point par un collège de Scientifiques européens et africains en 1998 (Projet VARINUTS, 1998) sont des outils qui peuvent être utilisés pour la collecte et la gestion des données ainsi que les simulations de calcul des bilans minéraux après leur calibrage et validation avec des données collectées localement dans les sites concernés.

Améliorer les méthodes de mesure de la production de N₂O

La mesure de la dénitrification potentielle *in vitro* que nous avons réalisée est une première étape indispensable dans le diagnostic des risques de dénitrification. Dans une deuxième étape on devrait mettre en œuvre la même méthode mais en prenant des échantillons de sol non remaniés, et dans une troisième étape, on devrait appliquer les méthodes de mesure *in situ*. Ces méthodes *in situ* décrites par Cellier et al. (1996) nécessitent une « instrumentation » de la parcelle difficilement réalisable en Afrique. Nous suggérons alors une méthode indirecte combinant à la fois le traçage isotopique ¹⁵N et la mesure des pertes par dénitrification exprimée en % de la production annuelle de N-NO₃⁻ dans le sol. Nous suggérons une méthode fondée sur la résolution d'un système de deux équations du premier degré à deux inconnues. Les deux inconnues sont Ng et P (P est la quantité de N-NO₃⁻ mise en jeu durant la saison des pluies). Le système de deux équations est le suivant :

$$P = NI + NdfS + Ng + Ni$$

$$Ng = \frac{d \times P}{100}$$

où Ng est le N dénitrifié, NI le N lixivié, NdfS la fraction de N_{tot} plante provenant du sol, Ni le N-NO₃⁻ immobilisé par voie microbienne (voir ci-après), d est un pourcentage exprimant la dénitrification par rapport à P.

Nous émettons l'hypothèse que Ni est très faible par rapport aux autres termes NI et Ng. Cette hypothèse est fondée sur le raisonnement suivant : (a) on sait que l'immobilisation microbienne est réalisée préférentiellement à partir du N-NH₄ plutôt que N-NO₃ ; (b) aucun apport N-NO₃ n'est réalisé dans nos conditions de cultures ce qui signifie que tout N-NO₃ mis en jeu a préexisté sous forme de N-NH₄⁺.

Compte tenu de l'hypothèse ci-dessus, il vient :

$$Ng = \frac{d}{100 - d} \times (NdfS + NI)$$

Le coefficient d est à déterminer *in situ* s'appuyant sur le modèle mis en œuvre par Germon (communication personnelle). D'après de nombreux auteurs ce coefficient est compris entre 10 et 15 % (Davet, 1996 ; Dommergues et Mangenot, 1970 ; Morel, 1989) mais on doit

admettre son imprécision ; sachant qu'il dépend des conditions écologique de la culture, il ne peut être fixé à priori.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

AFNOR, 1996 - Dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche. (Association française de Normalisation) NF ISO 106 96. In : *AFNOR Qualité des sols*, Paris, pp 189-200.

AFNOR, 1999a - Analyse granulométrique par sédimentation. Méthode de la pipette (Association française de Normalisation) NF X 31-107. In : *AFNOR Qualité des sols*, Paris, pp 57-72.

AFNOR, 1999b - Détermination du pH. (Association française de Normalisation) NF ISO 103 90. In : *AFNOR Qualité des sols*, Paris, pp 339-348.

ALLISON F.E., 1955 – The enigma of soil nitrogen balance sheets. *Adv.Agron.* 7 : 213-250.

ARRIVETS J., 1974 - Fertilisation des variétés locales de sorgho sur les sols ferrugineux tropicaux du plateau mossi (Haute Volta). Doc. IRAT - Haute Volta, 34p.

AZONTONDE H.A., 2000 - Dynamique de la matière organique et de l'azote dans le système Mucuna-Maïs sur un sol ferrallitique (terres de Barre) au Sud-Bénin. Thèse de Doctorat, ENSAM, 241p.

BADIANE A.N., 1993 - Le statut organique d'un sol sableux de la zone Centre-nord du Sénégal. Thèse de Doctorat INPL-ENSAIA, Nancy, 200p.

BALDERSTON W.L., SHERR B. and PAYENE W.J., 1976 - Blockage by acetylene of nitrous oxide reduction in *Pseudomonas perfectomarinus*. *Appl.Environ Microb* 31 : 504-508.

BALL-COELHO B.R. and ROY R.C., 1999 – Enhanced ammonium sources to reduce nitrate leaching. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 54 (1) : 73-80.

BARON C., CLOPES A., PEREZ P., MULLER B.L. et MARAUX F., 1996 – Sarra Modules Sarramet – CIRAD (eds), Montpellier, France.

BARRO A., 1999 – Evaluation de l'effet et de la faisabilité du travail du sol sur le sorgho photo-sensible à Saria (Burkina Faso). Thèse de Doctorat, Science du sol, ENSAM, 138p.

BERTRAND R., 1989 – Mécanismes d'aggrégation des sols tropicaux pauvres en argiles gonflantes. Rapport préliminaire de la mission de reconnaissance morphologique des régions de Saria (Burkina Faso) et de Molobala (Mali). Doc IRAT/CER/DRN 4, Montpellier, 35p.

BLONDEL D., 1971a - Contribution à l'étude de la croissance-matière sèche et de l'alimentation azotée des céréales de culture sèche au Sénégal. *Agron. Trop.* 26 : 707-720.

BLONDEL D., 1971b - Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral :
en sol sableux au Sénégal. *Agron. Trop.* 26 : 1303-1333
en sol ferrugineux tropical à Séfa. *Agron. Trop.* 26 : 1334-1353
en sol ferrugineux tropical à Nioro du Rip. *Agron. Trop.* 26 : 1354-1361.

BONZI M., 1989 - Etude des techniques de compostage et évaluation de la qualité des compostes : effets des matières organiques sur les cultures et la fertilité des sols. Mémoire d'ingénieur du développement rural, ISN/IDR-UO, 66p.

BIRCH H.F., 1958 - The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and Soil* 10 : 1-31.

CELLIER P., GERMON J.C., HENAULT C. et GENERMONT S., 1996 - Les émissions d'ammoniac (NH₃) et d'oxydes d'azote (NO_x et N₂O) par les sols cultivés : mécanismes de production et quantification des flux. In : *Maîtrise de l'azote dans les écosystèmes*. INRA (eds), les colloques, 83, pp 25-36.

CHABALIER P.F., 1980 – Utilisation de l'engrais par les cultures et pertes par lixiviation dans deux agrosystèmes de Cote d'Ivoire. In : *Nitrogen Cycling in West African Ecosystems*. T. Rosswall (eds), pp 393-398.

CHABALIER P.F., 1984 – Comparaison de deux méthodes de mesure de la lixiviation en sol ferrallitique. *Agron. Trop.* 39 (1) : 22-30.

CHARREAU C. et NICOU R., 1971 – L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. *Bulletin Agronomique*, 23, IRAT Paris, 254p.

CHOPART J.L. et NICOU R., 1976 – Influence du labour sur le développement racinaire des différentes plantes cultivées au Sénégal. Conséquences sur leur alimentation hydrique. *Agron. Trop.* 31 (1) : 7 – 28.

CISSE L., 1986 – Etude des effets d'apports de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du Centre-nord du Sénégal. Thèse de doctorat en sciences agronomiques, INPL, Nancy, 184p.

CISSE L. et VACHAUD G., 1988 - Influence des apports de matière organique sur la culture du mil et d'arachide sur un sol sableux du Nord Sénégal. I. Bilan de consommation, production et développement racinaire. *Agronomie* 8 : 315-326.

CORTIER B., 1994 – Le diagnostic hydrique des cultures et la prévision précoce des rendements en mil en zone sahélienne. In : *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropical*. John Libbey Eurotext, Paris, pp 349-362.

COULSON G.B., DAVIES R.L. and LEWIS D.A., 1960 – Polyphenols in plant, humus, and soil. I. Polyphenols of leaves, litter, and superficial humus from Mull and Mor sites. II. Reduction and transport by polyphenols of iron in model soil columns. *The Journ. of Soil Sc.* 11 (1) : 20-44.

CPCS (Commission de pédologie et de cartographie des sols), 1967 – Classification des sols, Multicopie, 96p.

CTIG/INERA, 2000 – Esquisse cartographique des unités morpho-pédologiques de Thiougou

DABIN B., 1967 – Sur une méthode d'analyse du P dans les sols tropicaux. In : *Colloque sur la fertilité des sols tropicaux*. Tananarive, Madagascar, pp 99-115.

DANCETTE C., 1979 – Agroclimatologie appliquée à l'économie de l'eau en zone soudano-sahélienne. *Agron. Trop.* 34 : 331-355.

DAVET P., 1996 – Vie microbienne du sol et production végétale. INRA (eds), Paris, pp 159-160.

DE GEUS J.G., 1967 - *Fertilizer Guide for tropical and subtropical farming*. Centre d'étude de l'azote. Conzett & Huber, Zurich, Switzerland, 727p.

DELPHIN J.E., 1986 - Evaluation du pouvoir minéralisateur des sols agricoles en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques. *Agronomie* 6 : 453-458.

DOMMERGUES Y.R. et MANGENOT F., 1970 - Ecologie microbienne du sol. Paris Masson, 795p.

DUKE H.R. and HAISE H.R., 1973 – Vacuum extractor to assess deep percolation losses and chemical constituents of soil water. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.* 37 : 963-974.

FAHMY T., 1995 – XLSTAT, Software add-in Microsoft Excel. <http://WWW.xlstat.com/>

FALLAVIER P., BABRE D. et BRESSE M., 1985 – Détermination de la capacité d'échange cationique des sols tropicaux acides. *Agron. Trop.* 40 (4) : 298-308.

FAO, 1991 - World Soil Resources : An Explanatory Note on the FAO world Soil Resources Map at 1:25000000 Scale. FAO, Rome, 58p.

FOREST F. et CORTIER B., 1990 – Le diagnostic hydrique des cultures et la prévision du rendement régional du mil cultivé dans les pays du CILSS. IRAT/CIRAD/AGRIMET. IAHS, publication, 199, pp 547-557.

FRANQUIN P. et FOREST F., 1977 - Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du Bilan hydrique. *Agron. Trop.* 39 (1) : 22-30.

FRENEY J.R., SIMPSON J.R. and DENMEAD O.T., 1981 – Ammonia volatilisation. In : *Terrestrial Nitrogen Cycles. Processes, Ecosystems Strategies and Management Impacts*. F.E. Clark and I. Rossval (eds), Stockholm. Ecol. Bull. 33, pp 291-302.

FRIED M. and BROASHART H., 1975 - An independent measurement of the amount of nitrogen fixed by legume crop. *Plant and Soil* 43 : 707-711.

FRIED M. and DEAM L.A., 1952 - A concept concerning the measurement of available soil nutrients. *Soil Sci.* 73 : 263-271.

GANRY F., 1990 - Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Thèse de Doctorat es-sciences. Université de Nancy I, 347p.

GANRY F., 1991 – Rôle de la fixation de N₂ dans l'amélioration durable de la fertilité azotée d'un sol sableux tropical par l'amendement calcique et organique. In : Actes de la IV^{ème} Conférence AABNF « *Fixation biologique de l'azote et stabilité de l'agriculture tropicale* ». Mulongoy K. (eds), IITA, Ibadan, Nigeria (John Wiley & Sons, United Kingdom), pp 317-331.

GANRY F. et BADIANE A., 1991 – Utilisation efficace des engrais pour accroître la production végétale. Efficience de l'urée apporté sur maïs. In : *Alleviating soil fertility constraints to increase crop production in West Africa*. Mokwunye A. Uzo (eds), Developments in plant and Soil Sciences, Nijhoff, Dordrecht, pp 227-237.

GANRY F. et DOMMERGUES Y., 1997 - Biological nitrogen fixation. Doc.Projet VARINUTS. Nutrient INPUT4, 18p.

GANRY F. et G. GUIRAUD, 1979 - Mode d'application du fumier et bilan azoté dans un système Mil-Sol sableux au Sénégal –Etude au moyen de ^{15}N . In : *Isotopes and radiation in research on soil-plant relationship*. IAEA (eds), AIEA-SM 235/16, Vienne, pp 313-331.

GENERMONT S., 1996 – Modélisation de la volatilisation d'ammoniac après épandage de lisiers sur parcelle agricole. Thèse Univ.Toulouse, 170p.

GERMON J.C., 1980 - Etude quantitative de la dénitrification biologique dans le sol à l'aide de l'acétylène :

I - Application à différents sols. *Ann. Microbiol. Inst.Pasteur* 131B : 69-80.

II - Evolution de l'effet inhibiteur de l'acétylène sur la N_2O réductase. Incidence de l'acétylène sur la vitesse de dénitrification et sur la réorganisation de l'azote nitrique. *Ann. Microbiol. Inst.Pasteur* 131B : 81-89.

GERMON J.C. et COUTON Y., 1999 – La dénitrification dans les sols : régulation de son fonctionnement et application à la dépollution. *Courrier de l'environnement* 38 : 67-74.

GIBSON A. H., DREYFUS B.L. and DOMMERGUES Y.R., 1982 – Nitrogen fixation by legumes in the tropics. In : *Microbiology of Tropical Soils and Plant Productivity*; Y.R. Dommergues and H.G. Diem (eds); Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers The Hagues, pp 37-73.

GIGOU J., 1982 - Dynamique de l'azote minéral en sol nu ou cultivé de la région tropicale sèche du Nord Cameroun. Thèse de Docteur-Ingénieur, USTL, Montpellier, 171p.

GUILLOBEZ S., 1985 - Milieu naturel du Burkina Faso. Esquisse physiographique . carte au 1/1000000. IRAT service de pédologie cartographie.

GUILLOBEZ S., 1992 - Caractéristiques climatiques influençant la dégradation et l'érosion des sols au Burkina Faso. Doc. CIRAD-CA-URFCM, Montpellier, 14p.

GUILLOBEZ S., 1998 - Apports d'azote atmosphérique par les pluies et les poussières, par sédimentation, par érosion et par ruissellement. NUTRIENT INPUTS 3 et 5. NUTRIENT OUTPUT 5. Projet VARINUTS, 9p.

GUINKO S., 1984 - Végétation de la Haute Volta. Thèse de Docteur es-sciences naturelles, Université de Bordeaux III, UER aménagement et ressources naturelles, Département l'homme et son environnement. TI et II, 349p.

GUIRA T., 1988 - Intensification de la culture de sorgho en sol ferrugineux. Etude des effets induits des techniques culturales sur la fertilité des sols. Mémoire d'ingénieur du développement rural, IDR/UO, 96p.

GUIRAUD G., 1984 - Contribution du marquage isotopique à l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux dans les systèmes sol-plante. Thèse d'Etat, Université P. et M. CURIE, Paris VI, 335 p.

HAUCK R.D., 1981 - Nitrogen fertilizer effect in nitrogen cycle process. In : *Terrestrial nitrogen cycles*. FE Clarand et T. Roswall (eds). Swedish Naturel Sc. Research Concl. Stockholm. *Ecol. Bull.* 33 : pp 551-562.

HAUCK R.D. and BREMNER J.H., 1976 – Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. *Advances in agronomy* 28 : 219-266.

HENAULT C., CHENEY D., HEURLIER K., GARRIDO F., PEREZ S. and GERMON JC., 2001 - Laboratory kinetics of soil denitrification are usefull to discriminate soils with potentially high level of N₂O emission on the field scale. *Agronomie*, in press.

HENAULT C. et GERMON JC., 1995 - Quantification de la dénitrification et des émissions de protoxyde d'azote (N₂O) par les sols. *Agronomie* 15 : 321-326.

HENIN S., 1980 – Rapport du groupe de travail Activités agricoles et Qualité des eaux. Ministère de l'Agriculture ; Ministère de l'environnement et du cadre de vie. Paris, 58p.

HENIN S., 1981 – Le cycle de l'azote: les problèmes de fertilisation et de pollution. C.R. Acad. Fr., 10, pp 846-858.

HERMANN B., JONES S.K., FUHRER J., FELLER U. and NEFTAL A., 2001 – N budget and NH₃ exchange of a grass/clover crop at two levels of N application. *Plant and Soil* 235 : 243-252.

HOUNGNANDAN P., SANGINGA N., WOOMER P., VANLEUWE B. and VAN CLEEMPUT O., 2000 – Symbiotic nitrogen fixation response of mucuna affected by rhizobial inoculation in farmers fields in the derived savanna of Benin. *Biol. Fertil. Soils*.

IAEA, 1990 - Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships. Training course serie 2, 223p.

INSD/Min Agri, 1997 – Rapports 1990-1997. Ministère de l'agriculture Burkina Faso, Institut National de la Statistique et de la Démographie, 70p.

JACQUIN F., 1963 – Contribution à l'étude des processus de formation et d'évolution de divers composés humiques. Thèse Fac. Sc. Nancy, 156p.

JANSSEN B.H., GUIKING F.C.T., VAN DER EIJK D., SMALING E.M.A., WOLF J. and VAN REULER H., 1990 - A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFT). *Geoderma* 46 : 299-318.

JENNY H., 1964 – Etudes agropédologiques des stations de Saria et de Farako-Bâ (Haute Volta). Rapport IRAT/ Haute-Volta. Ouagadougou.

KAMBIRE S. H., 1994 - Systèmes de cultures paysans et productivité des sols ferrugineux lessivés du Plateau Central (Burkina Faso) : effets des restitutions organiques. Thèse de 3^{ème} cycle, U.C.A.D. de Dakar, 153p.

KANDLER E., 1995 - N-mineralization under waterlogged conditions. In : *Methods in soil biology*. Schinner F. et al. (eds.). Berlin : Springer-Verlag, pp 141-143.

KEENEY D., 1986 – Sources of nitrate to ground water. In : *Critical reviews in environmental control*, 16, C.P. Staub (eds), CRC Press Boca Raton, Florida, pp 257-304.

KWAKYE P.K. and OFORI C.S., 1977 – The use of isotope in fertilizer efficiency studies on groundnuts (*Arachis hypogaea*) and cowpea (*Vigna unguiculata*). Research contract No.1230/RB, Soil Research Institut, Kwadaso-Kumasi, Ghana, 25p.

LAHAYE J.P., 1980 - Etude des pluies journalières de fréquence rare en Haute Volta. *Rapport CIE multigr.*, 30p.

LAUER D.A., BOULDIN D.R. and KLAUSMER S.D., 1976 – Ammonia volatilisation from dairy manure spread on the soil surface. *J. Environ. Qual.* 5 : 134-141.

LEGG J. O. and ALLISON F. E., 1960 - Influence of fertilizer nitrogen application rate on the uptake of soil N by Sudan grass (*Sorghum bicolor*). Trans. 7th Intern. Congr. soil sci. (Madison) II.

LEGG J. O. and J. J. MEISINGER, 1982 - Soil nitrogen budgets. In: *Nitrogen in agriculture soils*. F.J. Stevenson et al. (eds). *Agronomy* 22 : 503-557.

LOMPO F., BONZI M., ZOUGMORE R. and YOUL S., 2000 - Rehabilitating soil fertility in Burkina Faso. In : *Nutrients on the move – Soil fertility dynamics in African farming systems*. Hilhorst T. and Muchena F.M. (eds) 2000, IIED-London, pp 103-118.

MACHET J.M., P. DUBRULLE and LOUIS P., 1990 - Azobil : a computer program for fertilizer N recommendations based on a predictive balance sheet method. In : *Proceedings of the first congress of the European Society of Agronomy* S2-21.

MARIOTTI A. and LETOLLE R., 1978 – Analyse isotopique de l'azote au niveau des abondances naturelles. *Analysis* 6 (10) : 421-425.

MARY B. and RECOUS S., 1993 – Calcul des flux d'azote dans les sols par traçage isotopique ¹⁵N. In : *Utilisation des isotopes stables pour l'étude du fonctionnement des plantes*, P. MAILLARD et R. BONHOMME, INRA (eds), Paris. Les Colloques, 70, pp 277-297.

MEYER J., GERMANI G., DREYFUS B., SAINT-MACARY H., GANRY F. et DOMMERGUES Y.R., 1982 – Estimation de l'effet de deux facteurs limitant sur la fixation de l'azote (C₂H₂) par l'arachide et le soja. *Oléagineux* 37 (3) : 127-134.

MIETTON, 1988 - Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. Contribution géomorphologique à l'étude de l'érosion en zone tropicale de savane. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Lettres. Université de Grenoble, 438p.

MOAL J.F., MARTINEZ J., GUIZIOU F. and COSTE C.M., 1995 – Ammonia volatilisation following pig and cattle slurry in France. *J. Agric. Sci.* 125 : 245-252.

MOREL R., 1989 – Les sols cultivés. Tec. Doc., Paris, 380p.

MOUTONNET P., PAGENEL J.F. and FARDEAU J.C., 1993 – Simultaneous field measurement of nitrogen and matric prssure Heda. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 27 : 1458-1462.

MUGHOGHO S.K., BATIONO A., CHRISTIANSON B. and G.VLEK P.L., 1985 – Management of nitrogen fertilizers for tropical African soils. In : *Management of nitrogen and phosphorus fertilizers in sub-saharan Africa*, Mokuwonye A.U. and Vlek P.L.G. (eds), pp 117-172.

- MYERS R. J. K., 1987 - Nitrogen management of upland crops: from cereals to food legumes to sugarcane. In : *Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems*..J. R. Wilson (eds), C.A.B. International Wallingford, Oxon OX10 8DE, UK, pp 257-273.
- NDIAYE M.A.F., SPENCER M.M. and GUEYE M., 2000 – Genetic variability in dinitrogen fixation between cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) cultivar determined using the nitrogen-15 isotope dilution technique. *Biol. Fertil. Soils* 32 : 318-320.
- NICOU R., 1975 - Le problème de la prise en masse à la dessiccation des sols sableux de la zone tropicale sèche. *Agron. Trop.* 30 (4) : 325-343.
- NICOU R. et CHOPART J.L., 1979 - Les techniques d'économie de l'eau dans les sols sableux du Sénégal. In : *Soil physical properties and crop production in the tropics*. John Wiley & Sons, New York. Lal R., D.J. Greenland (eds), pp 375-384.
- NOMMIK H., 1956 - Investigation on denitrification on soil. *Acta. Agric. Scand.* 6 : 195-228.
- OLIVER R., 1999 – Note technique NT99-02 SOLTROP, mise à jour 11/99. CIRAD, Montpellier.
- OLIVER R., MARTIN C., BONZI M. et GANRY F., 1998 – Etude des pertes par lixiviation dans la région du Centre Sud du Burkina Faso. In : Quantification des « flux difficiles ». Project « Varinuts », INCO-DC, 12p.
- ORANGE D., GAC J.Y. and DIALLO M.I., 1993 - Geochemical assessment of atmospheric deposition including Harmattan dust in continental West Africa. In : *Tracers in hydrology : Proceeding of the international symposium held at Yokohama, Japan*. Peters N.E.(eds), IAHS Press Wallingford, UK, pp 303-312.
- ORSINI L. et REMY J. C., 1976 - Utilisation du chlorure de cobaltihexammine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude des Sols* 4 : 269-275.
- PALMA LOPEZ D., 1994 - Contribution à l'études des potentialités agricoles et des flux azotés dans divers sols cultivés en maïs. Thèse de doct de l'INPL, 288p.
- PICHOT J., SEDOGO P.M., POULAIN J.F. et ARRIVETS J., 1981 - Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence des fumures minérales et organiques. *Agron. Trop.* 36 (2) : 12-133.
- PIERI C., 1979 – Etude de la composition de la solution d'un sol sableux cultivé du Sénégal, à l'aide de capteur en céramique poreuse. *Agron. Trop.* 34 : 9-22.
- PIERI C., 1982 – Estimation du bilan des pertes moyennes en eau et en éléments minéraux dans une succession culturale mil-arachide (1979 à 1981), Montpellier IRAT-AIEA, 26p.
- PIERI C., 1989 – Etude de la composition de la solution d'un sol sableux cultivé au Sénégal à l'aide de capteurs de céramique poreuse. *Agron. Trop.* 34 (1) : 9-22.
- PIERI C., GANRY F. and SIBAND P., 1978 - A case study of nitrogen and potassium millet fertilization in Senegal. *Agron. Trop.* 13 : 32-39.

POSS R., 1991 – Transferts de l'eau et des éléments minéraux dans les terres de Barre du Togo. Conséquences agronomiques. Thèse Université Paris VI, 335p.

PRATT P.F., LUND L.J. and RIBLE J.M., 1978 – An approach to measuring leaching of nitrate from freely dried irrigated fields. In : *Nitrogen in the environment*. Academic Press New York 1, pp 223-256.

RANDALL G.W. and MULLA D.J., 2001 – Nitrate nitrogen in surface waters as influenced by climatic conditions and agricultural practices. *J. Environ. Qual.* 30 : 337-344.

REYDELLET I., LAURENT F., OLIVER R., SIBAND P. et GANRY F., 1997 – Quantification par méthode isotopique de l'effet de la rhizosphère sur la minéralisation de l'azote (cas d'un sol ferrugineux tropical). *Agronomie* 320 : 843-847.

REYNOLDS C.M. and WOLF D.C., 1987 – Influence of urease activity and soil properties on ammonia volatilisation from urea. *Soil Science* 143 (6) : 412-430.

RICHARD C., 1963 - Pluviométrie et étude physico-chimique des eaux de pluie. *Agron. Trop.* 19(12) : 1074-1080.

ROBERSTON G.P., 1993 – Flux of nitrous oxide and others nitrogen trace gases from intensively managed landscapes : a global perspective. In : *agricultural ecosystems effects of trace gases and global climate change*. LA Harper, AR Mosier, JM Duvourry, DE Rolston, (eds), Inc. Madison, WI, USA. *Am. Soc. Agron.*, pp 95-108.

RODHE H., 1990 – A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science* 248 : 1217-1219.

ROOSE E., 1979 - Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux sous sorgho et sous savane soudano-sahélienne. Saria (Haute Volta), synthèse des campagnes 1971-1974, ORSTOM Paris, 123p.

ROOSE E., 1980 - Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Thèse, 587p.

SANOGO J.L., 1997 – Maîtrise de l'azote dans un système cotonnier-sorgho: Prévion de la fumure organique et azotée en zone Mali-sud. Thèse de Doctorat, ENSAM, 82 p.

SEBILLOTTE M. et MEYNARD J.M., 1990 – Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées. In : *Nitrates-agriculture-eau*. R.Clavet (ed) INRA, Paris, pp 289-312.

SEDOGO P.M., 1981 - Contribution à la valorisation des résidus culturaux en sol ferrugineux et sous climat tropical semi-aride (matière organique du sol et nutrition azotée des cultures). Thèse de Docteur-Ingénieur. INPL-ENSAIA, Nancy, 198p.

SEDOGO P.M., 1993 - Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture: Incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de Doctorat d'Etat es-sciences. Université Nationale de Côte d'Ivoire, 285p.

SEDOGO P.M., LOMPO F. et BONZI M., 2001 – Synthèse des travaux sur le Burkina Phosphate. Doc. de travail, Unité de Gestion de la Fertilité des Sols, Min. Agri. Burkina Faso, 60p.

- SMALING E.M.A. and FRESCO L.O., 1993 – A decision-support model for monitoring nutrient balances under agriculture land use (NUTMON). *Geoderma* 60 : 235-256.
- SMALING E.M.A., STOORVOGEL J.J. and WINDMEIJER P.N., 1993 - Calculating nutrient balances in Africa at different scales. II. District scale. *Fert. Res.* 35 : 237-350.
- SOME L., 1989 - Diagnostic agroclimatique du risque de sécheresse au Burkina Faso- Etude de quelques techniques agronomiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, de mil, et de maïs. Thèse de Doctorat, USTL, Montpellier II, 312p.
- SOME L., TAONDA J.B. et GUILLOBEZ S., 1992 - Le milieu physique du Burkina Faso et ses contraintes. Actes du séminaire INERA sur « gestion des eaux et des sols pour une agriculture durable » , 24-27 mars 1992, Ouagadougou, 16p.
- SOME L. et SIVAKUMAR M.V.K., 1994 - Analyse de la longueur de la saison culturale en fonction de la date de début des pluies au Burkina Faso. *Compte rendu des travaux I, INERA/ICRISAT*.
- SOMMER S.G. and JACOBSEN O.H., 1999 – Infiltration of slurry liquid and volatilisation of ammonia from surface applied pig slurry as affected by soil water content. *J. of Agric. Sci. Cambridge* 132 : 297-303.
- SOMMER S.G., OLESEN J.E. and CHRISTENSEN B.T., 1991 – Effect of temperature, wind speed and air humidity on ammonia volatilization from surface applied cattle slurry. *J.Agric.Sci.* 117 : 91-100.
- SPRENT J.I., 1972 – The effect of water stress on nitrogen-fixing roots nodules. IV. Effects on whole plant *Vicia faba* and *Glycine max*. *New Phytologist* 71 : 603-611.
- SPRENT J.I., 1976 – Water deficit and nitrogen-fixing roots nodules. In : *Water Deficit and Plant Growth*, 4, pp 291-315.
- SPSS Version 9 – Statistical Package for Social Science, Site web. WWW.Spss.com
- STOORVOGEL J.J., BONZI M. and GICHERU P., 1998 – Spatial variation in soil nutrients stocks in sub-saharan farming systems. In : Varinuts project report. INCO-DC, NL, 31p.
- STOORVOGEL J.J., SMALING E.M.A. and JANSSEN B.H., 1993 – Calculating nutrient balances in Africa at different scales. I. Supra-national scale. *Fert. Res.* 35 : 227-235.
- THOMPSON R.B., PAIN B.F. and REES Y.J., 1990 – Ammonia volatilization from cattle slurry following surface application to grassland. 2. Influence of application rate, wind-speed and applying slurry in narrow bands. *Plant and Soil* 125 : 119-128.
- UNFCCC, 1997 – Le protocole de KYOTO. Cf site Web : [http:// WWW.unfccc.de](http://WWW.unfccc.de)
- VAN CLEEMPUT O., 1998 – Subsoils : chemo-and biological denitrification, N₂O and N₂ emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52 (2/3) : 187-194.
- VAN DER WEERDEN T.J. and JARVIS S.C., 1997 – Ammonia emission factor for N fertilizers applied to two contrasting grassland soils. *Environ. Pollut.* 95 : 205-211.

VANCE C.P., 2001 – Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources. *Plant physiology* 127 : 390-397.

VANLEUWE B., AIHOU K., HOUNGNANDAN P., DIELS J., SANGINGA N. and MERCKX R., 2001 – Nitrogen management in “adequate” input maize-based agriculture in the derived savanna benchmark zone of Benin Republic. *Plant and Soil* 228 : 61-71.

VERCHOT L.V., 2002 - Biogeochemical control of soils emissions of N oxides and uptake of CH₄ following land-use change in eastern Amazonia. *Comm. Jour. Séquestr.-C soil tropicaux*. CIRAD-IRD.

VITEN A.J.A. and SMITH K.A., 1993 - Nitrogen cycling in agricultural soils. In : *Nitrate : processes, patterns and management*. Burt A.L. Heathwaite et S.T. Trudgill (eds), England, pp 39-74.

VLEK L.G. and STUPE J.M., 1978 – Effects of solution chemistry and environmental conditions on ammonia volatilisation losses from aqueous systems. *Soils Sc. Soc. Amer. J.* 42 : 416-421.

VON CARLOW P. G., 1989 - Agroforestry technologies and fodder production-concepts and examples. *Agroforestry Systems* 9 : 1-16.

WANEUKEM V., 1995 - Appréciation de la fourniture d'azote par le sol. Cas des sols cultivés en maïs de la zone Sud-Soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat ENSAM, Montpellier, 96p.

WARING S.A. and J.M. BREMNER, 1964 - Ammonium production in soil under water logged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature* 4922 : 951-952.

WETSELAAR R., 1961 - Nitrate distribution in tropical soils. II : extent of capillary accumulation of nitrate during a long dry period. *Plant and Soil* 16 (2) : 121-133.

WETSELAAR R., 1962 - Nitrate distribution in tropical soils.III: Downward movement and accumulation of NO₃⁻ in the subsoil. *Plant and Soil* 16 (1) : 19-31.

WETSELAAR R., 1967 – Estimation of nitrogen fixation by four legumes in dry monsoon area of North West Australia. *Aust. J. Agric. Res. Anim. Husb.* 14 (3) : 319-329.

WETSELAAR R. et GANRY F., 1982 - Nitrogen balance in tropical agrosystems. In : *Microbiologie of tropical soils and plant productivity*. Y.R. DOMMERGUES et H.G. DIEM (eds.), MARTINUS Nijhoff and W. Junk., The Hague, pp 1-35.

WEY J., 1995 - Définition des facteurs limitants de la production du maïs dans l'ouest du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, INPL-ENSAIA, Nancy, 200p.

WEY J. et OBATON M., 1978 – Influence de quelques techniques culturales sur l'activité fixatrice d'azote et le rendement de l'arachide. *Agron Trop* 33 : 129-136.

WISCHMEIER W.M. and SMITH D.D., 1987 – Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *Agri. Handbook* 537, U.S. Depmt. of Agric, Washington DC, 58p.

YOSHINARI T. and KNOWLES R., 1976 – Acetylene inhibition of nitrous oxide reduction by denitrifying bacteria. *Biochem. Biophys. Res. Commun* 69 : 705-710.

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1a : Dispositif parcellaire de l'essai longue durée de Saria

Annexe 1b : Composition minérale du fumier de Saria (en %)

Annexe 2 : Plan parcellaire d'un essai ^{15}N maïs en milieu paysan (Thiougou).

Annexe 3a : Dynamique de N-NO_3^- *in situ* dans les sols avant et après incubation en station

Annexe 3b : Vitesse de nitrification (Vit nitrif) et nitrification nette (nitrif nette) pendant une année en station

Annexe 3c : Dynamiques de N-NO_3^- (fig de gauche) et vitesses de nitrification (Vit nitrif) (fig. de droite) en milieu paysan

Annexe 4 : Fiches techniques des variétés de cultures utilisées dans les essais

Annexe 5 : Plan d'une sous parcelle ^{15}N de sorgho, essai en station, Saria

Annexe 6 : Quantité et pourcentage de N engrais dans le sorgho à la récolte.

Annexe 7 : Pourcentage de N immobilisé (NiS) dans le profil du sol exploitable par le sorgho (0-80cm).

Annexe 8 : Les pertes de N engrais hors du système sol-plante

Annexe 9 : Caractéristiques physico-chimiques des sols (0-20 cm)

Annexe 10 : Plan d'une sous parcelle ^{15}N (mil et niébé), essai fixation de N_2 par le niébé

Annexe 11 : NdfF (% et en kg ha^{-1}) et Asol (kg ha^{-1}) relatifs à la plante non nodulante, mil (*Pennisetum typhoides*)

Annexe 11₁ : NdfF (% et en kg ha^{-1}) et Asol+fix (kg ha^{-1}) relatifs à la plante nodulante, niébé (*Vigna inguiculata*), variété KVx 414-22-2

Annexe 11₂ : Quantité et Pourcentage de N trouvés dans les parties aériennes de la plante de niébé provenant de la fixation symbiotique de N_2 (NdfFix)

Annexe 12₁ : Caractéristiques physico-chimiques des sols en milieu paysan

Annexe 12₂ : NdfF (% et kg ha^{-1}) et CRU % en milieu paysan, essais maïs

Annexe 12₃ : NdfS (kg ha^{-1}) et CAU % en milieu paysan, essais maïs

Annexe13a : Calcul des exportations N (outputs) et estimation des inputs N (atmosphérique, engrais et fixation N_2) pour le traitement te

Annexe13b : Calcul des exportations N (outputs) et estimation des inputs N (atmosphérique, engrais et fixation N_2) pour le traitement fm

Annexe13c : Calcul des exportations N (outputs) et estimation des inputs N (atmosphérique, engrais et fixation N_2) pour le traitement fmo

Annexe13d : Calcul des exportations N (outputs) et estimation des inputs N (atmosphérique, engrais et fixation N_2) pour le traitement FM

Annexe13e : Calcul des exportations N (outputs) et estimation des inputs N (atmosphérique, engrais et fixation N_2) pour le traitement FMO

Annexe 14 : Principe et fonctionnement d'un tensionic.

Annexe 15 : Quantité moyenne d'éléments lixiviés ($\text{kg } 10^2 \text{ ha}^{-1}$)

Annexe 16 : Régression entre N volatilisé et les données du sol.(SPSS, mode ENTER)

Annexe 17₁ : Production de N_2O et dénitrification potentielle, monoculture de sorgho, essai longue durée de Saria ($\mu\text{g N-N}_2\text{O g}^{-1} \text{ sol sec}$)

Annexe 17_{1 suite1} : Production de N_2O et dénitrification potentielle, rotation sorgho-niébé, essai longue durée de Saria ($\mu\text{g N-N}_2\text{O g}^{-1} \text{ sol sec}$)

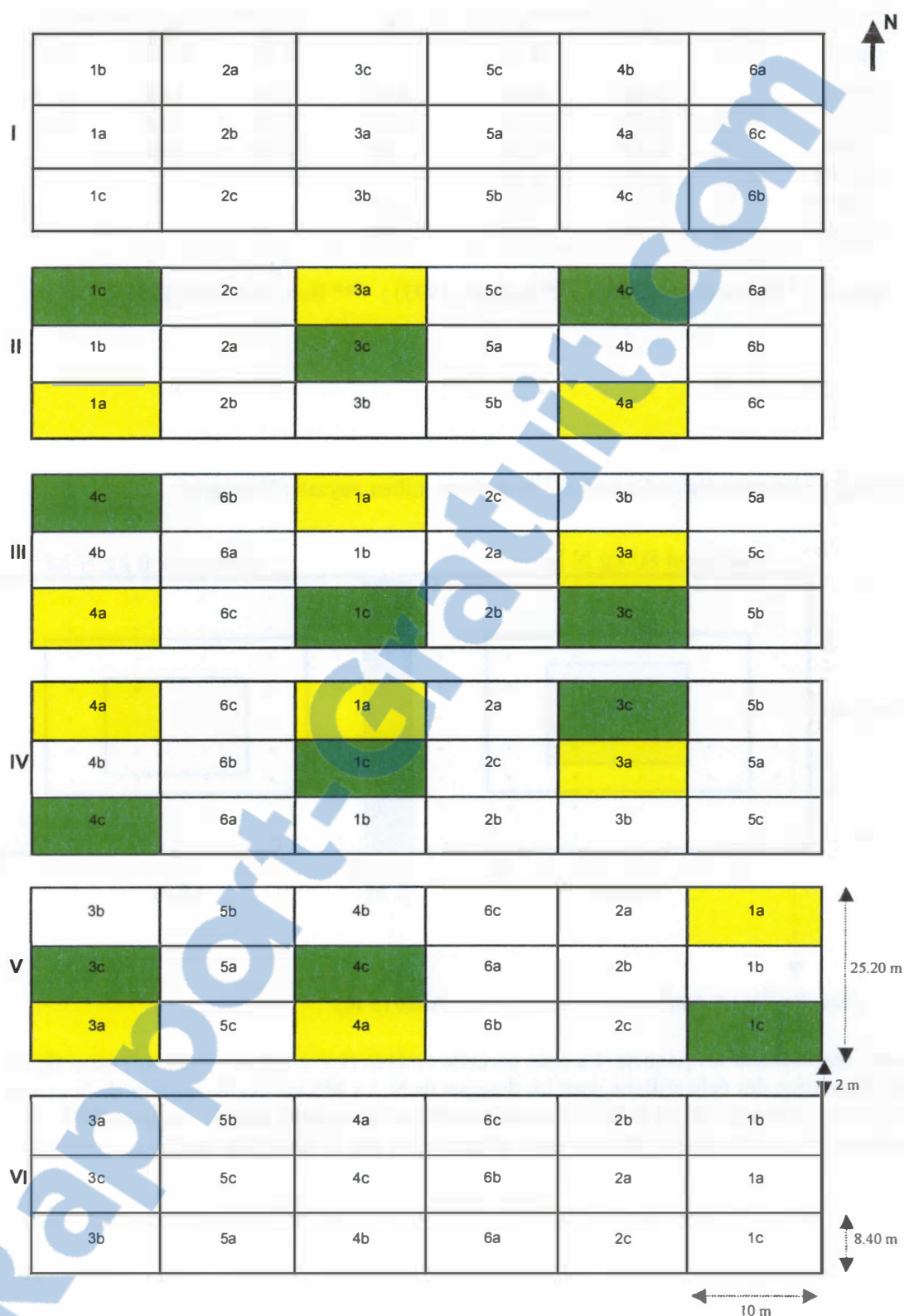
Annexe 17_{1 suite2} : Production de N_2O et dénitrification potentielle, haut, mi et bas de pente d'une toposéquence de Saria ($\mu\text{g N-N}_2\text{O g}^{-1} \text{ sol sec}$)

Annexe 17_{1 suite3} : Production de N_2O et dénitrification potentielle, champ de brousse et champ de case de Thiougou ($\mu\text{g N-N}_2\text{O g}^{-1} \text{ sol sec}$)

Annexe 17₂ : Production de CO_2 ($\mu\text{gC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ sol sec}$)

Annexe 18 : Cycle de l'azote d'après Cellier et al.(1996) (les composés sous forme gazeuse sont entourés d'un cercle)

Annexe 1a : Dispositif parcellaire de l'essai longue durée de Saria



1 : te ; 2 : fmr ; 3 : fmo ; 4 : fm ; 5 : FMO ; 6 : FM

a = monoculture de sorgho ; b = rotation sorgho-coton ; c = rotation sorgho-niébé

II, III, IV, V = blocs choisis pour les différentes études

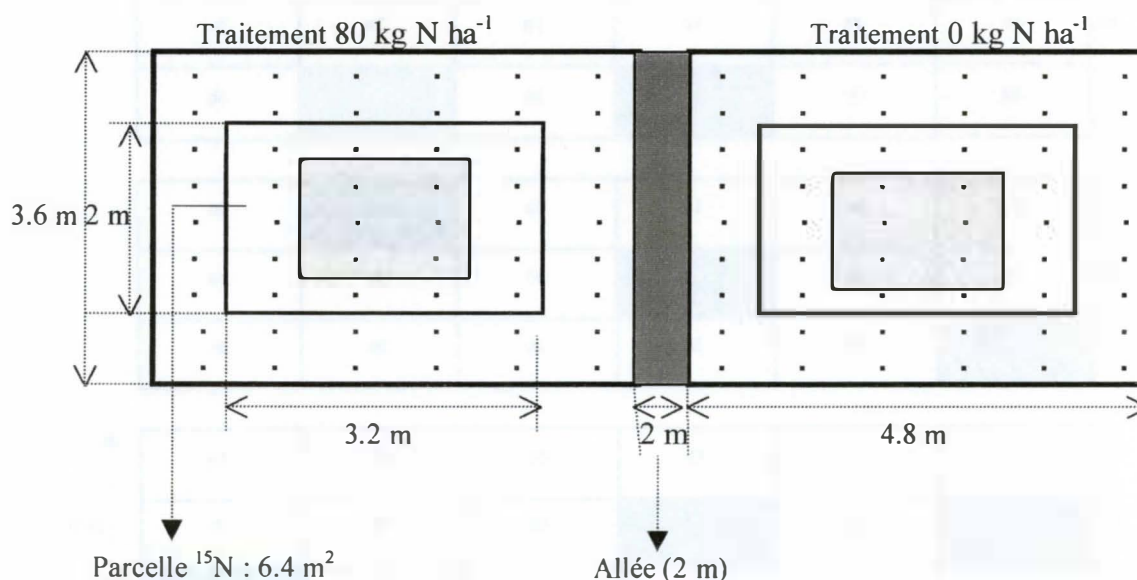
Les parcelles coloriées sont celles utilisées dans les essais ¹⁵N.

Annexe 1b : Composition minérale du fumier de Saria (en %)

	C	N	P	K	Ca	Mg	Na
1966*	27.30		0.21		1.30	0.77	0.25
1970*		2.30	0.20	4.50	1.70	0.68	0.18
1972*	35.00	2.47	0.22	4.30	1.00	0.67	0.25
1978*	21.70	1.47	0.24	1.60	1.10	0.49	
1981**	21.70	1.47	0.23				
1988***	22.30	1.27	0.21	2.50			
2000***	23.00	1.50	0.20	2.20			

Source : * Pichot et al. (1981) ; ** Sedogo (1993) ; *** Bonzi (1989 et 2000)

Annexe 2 : Plan parcellaire d'un essai ^{15}N maïs en milieu paysan (Thiouguou).



Les points représentent les poquets. La sous parcelle ombrée (1.6 x 1.2 m = 1.92 m²) est celle récoltée pour la préparation des échantillons pour les dosages de N. La MS est évalué à partir de la parcelle ^{15}N entière pour le traitement 80 kg N ha⁻¹, et sur la superficie équivalente dans le traitement 0 kg N ha⁻¹.
Densité de semis : entre lignes : 80 cm ; entre poquets : 40 cm ; 2 plants par poquet.

Annexe 3a : Dynamique de N-NO₃⁻ *in situ* dans les sols avant et après incubation en station

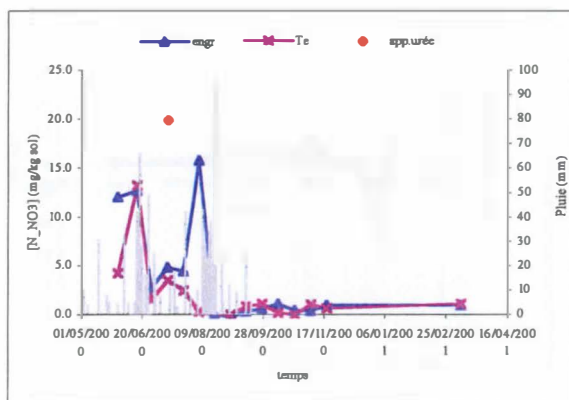
Date prélèvement	Trait.	N-NO ₃ ⁻ avant incubation						N-NO ₃ ⁻ après incubation					
		mg kg ⁻¹ sol						mg kg ⁻¹ sol					
		rép2	rép3	rép4	rép5	moy	ecartype	rép2	rép3	rép4	rép5	moy	ecartype
24/05/2000	te	4.8	1.2	3.3	6.0	3.8	2.1						
07/06/2000	te		5.7	4.5	5.6	5.3	0.7	1.9		3.1	2.1	2.4	0.6
21/06/2000	te	5.2	6.7	2.4	13.5	6.9	4.8	6.7	4.0	7.2		6.0	1.7
06/07/2000	te	4.3	0.9	4.1	0.6	2.5	2.0	0.8	0.8	0.2	3.6	1.4	1.5
19/07/2000	te		2.0	1.5	1.7	1.7	0.3	1.6	1.5	7.7	2.8	3.4	2.9
01/08/2000	te		0.9	0.8	0.8	0.8	0.0	1.3	0.3	1.0		0.9	0.5
14/08/2000	te	2.3	1.1	1.3		1.6	0.6	2.3	1.9	2.0		2.1	0.2
28/08/2000	te		0.8	1.2	0.8	0.9	0.2	2.8		2.7		2.8	0.1
10/09/2000	te	0.5		0.6	0.1	0.4	0.3		2.3	2.1	2.0	2.1	0.2
23/09/2000	te		3.3	3.7	0.2	2.4	1.9		1.2	1.6	1.6	1.5	0.2
06/10/2000	te		1.8		0.4	1.1	1.0		3.3	4.0	3.1	3.4	0.5
20/10/2000	te	0.2	0.2		0.2	0.2	0.0	0.4	2.7	2.2	0.8	1.5	1.1
29/11/2000	te	1.7	2.0		2.1	1.9	0.2	1.3	3.6	2.8	1.3	2.3	1.2
27/12/2000	te	1.0		1.7	1.4	1.4	0.3	0.7	1.2		2.1	1.3	0.7
24/01/2001	te	1.3	1.1		2.2	1.5	0.6	1.0	3.3	3.2	1.1	2.2	1.3
23/02/2001	te	1.7	2.0		2.0	1.9	0.2	1.4	3.6	2.8	1.3	2.3	1.2
24/05/2000	fm	2.2	2.6		3.5	2.8	0.7						
07/06/2000	fm	3.7	2.6		3.7	3.3	0.6	6.2	0.9	3.5	3.1	3.4	2.2
21/06/2000	fm	6.9	7.9	5.9		6.9	1.0	6.3	8.7	8.4	5.8	7.3	1.5
06/07/2000	fm	6.7	1.4	4.9	3.1	4.0	2.3		0.3	0.5	0.6	0.5	0.2
19/07/2000	fm	4.3	2.1	1.0	3.4	2.7	1.5		0.8	0.9	0.4	0.7	0.2
01/08/2000	fm	0.7	1.0	1.0		0.9	0.2	0.6	0.2	1.7	1.3	1.0	0.7
14/08/2000	fm		3.6	3.4	2.6	3.2	0.5		4.3	4.6	5.1	4.7	0.4
28/08/2000	fm	5.9	5.2	6.0		5.7	0.4	10.8	14.8	9.0	4.2	9.7	4.4
10/09/2000	fm	3.6	1.3	2.7	0.6	2.0	1.3	6.0	7.1		5.2	6.1	1.0
23/09/2000	fm	11.1	4.0	7.9	1.2	6.1	4.3		1.7	1.5	1.4	1.5	0.2
06/10/2000	fm	3.7	0.9	3.5	0.2	2.1	1.8		2.3	3.2	2.7	2.7	0.4
20/10/2000	fm		0.1	0.3	0.0	0.2	0.1	2.4		1.1	1.7	1.7	0.7
29/11/2000	fm		3.9	1.6	1.0	2.2	1.5		1.5	2.1	2.4	2.0	0.5
27/12/2000	fm	2.1	1.4		1.1	1.5	0.5		1.2	1.1	1.0	1.1	0.1
24/01/2001	fm	5.6	3.8	1.9	1.3	3.1	2.0	9.1	7.2	1.9	0.8	4.8	4.0
23/02/2001	fm		3.8	1.5	1.0	2.1	1.5		1.4	2.1	2.3	1.9	0.4
24/05/2000	fmo	7.2	5.2		7.5	6.6	1.3						
07/06/2000	fmo	14.4	9.5	14.2		12.7	2.8	7.9		5.2	5.6	6.2	1.5
21/06/2000	fmo	5.6	13.6	11.8	9.0	10.0	3.5	5.2	6.0		8.3	6.5	1.6
06/07/2000	fmo	4.4	3.7	4.3		4.1	0.4	3.6	5.2		3.6	4.2	0.9
19/07/2000	fmo	0.2	1.0		1.3	0.8	0.6	0.2	3.9		4.0	2.7	2.1
01/08/2000	fmo		4.7	5.7		5.2	0.7	0.0	5.0		0.0	1.7	2.9
14/08/2000	fmo	7.5	15.7	13.9	10.1	11.8	3.7		5.5	5.9	5.1	5.5	0.4
28/08/2000	fmo	3.7	5.4	9.7		6.3	3.1	13.8		13.9	13.5	13.7	0.2
10/09/2000	fmo	4.1		0.9	5.1	3.4	2.2	7.1	2.8	8.1		6.0	2.8
23/09/2000	fmo	3.4	8.3	0.7	4.6	4.3	3.1	3.3		2.4	2.7	2.8	0.4
06/10/2000	fmo	2.4		2.3	2.4	2.4	0.1	4.5		1.9	5.1	3.8	1.7
20/10/2000	fmo	1.0	11.5	1.4	14.6	7.1	7.0	1.7		1.7	2.4	2.0	0.4
29/11/2000	fmo	9.3		8.9	6.0	8.1	1.8	4.6	2.3	7.3	5.4	4.9	2.1
27/12/2000	fmo	3.7	7.3	3.9	6.5	5.3	1.8		3.8	1.5	1.6	2.3	1.3
24/01/2001	fmo	8.0		6.1	3.7	5.9	2.1	3.1		2.6	3.3	3.0	0.3
23/02/2001	fmo	9.4		8.6	5.8	7.9	1.9	4.5	2.3	7.1	5.1	4.7	2.0

Annexe 3b : Vitesse de nitrification (Vit nitrif) et nitrification nette (nitrif nette) pendant une année
en station

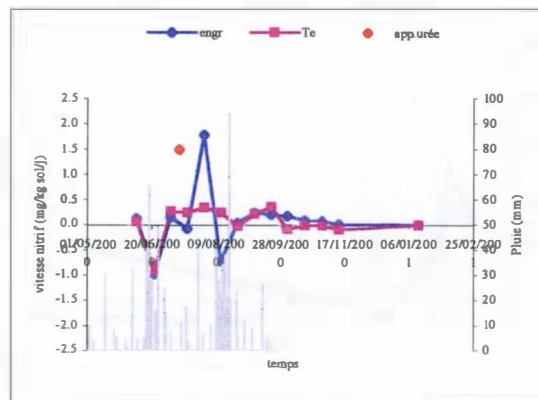
Date prélèvement	Trait.	Vitesses de nitrification (mg kg ⁻¹ sol jour ⁻¹)						Quantité de nitrates		
		rép2	rép3	rép4	rép5	moyenne	ecartype	Qt N-NO ₃ mg kg ⁻¹	cumul mg kg ⁻¹	cumul kg ha ⁻¹
07/06/2000	te	-0.201	0.220	-0.020	-0.280	0.00	0.22	0.000	0.00	0.00
21/06/2000	te	0.328	-0.125	0.192	0.486	0.22	0.26	3.083	3.08	9.99
06/07/2000	te	-0.292	-0.396	-0.141	-0.661	0.00	0.22	0.000	3.08	9.99
19/07/2000	te	-0.202	0.046	0.281		0.04	0.24	0.542	3.63	11.75
01/08/2000	te	-0.418	-0.129	-0.036	0.071	0.00	0.21	0.000	3.63	11.75
14/08/2000	te	0.038	0.079	0.093	0.167	0.09	0.05	1.226	4.85	15.72
28/08/2000	te	0.041	0.013	0.096		0.05	0.04	0.699	5.55	17.98
10/09/2000	te	0.075	0.115	0.070	0.090	0.09	0.02	1.137	6.69	21.67
23/09/2000	te	0.027	-0.047	0.078	0.115	0.04	0.07	0.559	7.25	23.48
06/10/2000	te	0.037	-0.004	0.024	0.217	0.07	0.10	0.892	8.14	26.37
20/10/2000	te	-0.002	0.060	-0.060	0.026	0.01	0.05	0.084	8.22	26.64
29/11/2000	te	0.029	0.087	0.049	0.028	0.05	0.03	0.000	8.22	26.64
27/12/2000	te	-0.036	-0.031	-0.048	0.001	0.00	0.02	0.000	8.22	26.64
24/01/2001	te	-0.001	0.002	0.055	-0.008	0.01	0.03	0.000	8.22	26.64
23/02/2001	te	0.003	0.085	-0.041	-0.030	0.00	0.06	0.000	8.22	26.64
07/06/2000	fin	0.286	-0.125	-0.306	-0.027	0.00	0.25	0.000	0.62	1.98
21/06/2000	fin	0.184	0.433	0.551	0.149	0.33	0.19	4.609	5.23	16.64
06/07/2000	fin	-0.370	-0.505	-0.357	-0.129	0.00	0.16	0.000	5.23	16.64
19/07/2000	fin	-0.376	-0.053	-0.310		0.00	0.17	0.000	5.23	16.64
01/08/2000	fin	-0.291	-0.141	0.053	-0.158	0.00	0.14	0.000	5.23	16.64
14/08/2000	fin	0.696	0.254	0.278	0.283	0.38	0.21	4.908	10.14	32.24
28/08/2000	fin	0.345	0.806	0.402		0.52	0.25	7.245	17.38	55.28
10/09/2000	fin	0.010	0.149	0.276	-0.137	0.07	0.18	0.968	18.35	58.36
23/09/2000	fin	0.049	0.035	-0.094	0.056	0.01	0.07	0.152	18.50	58.84
06/10/2000	fin	0.320	-0.128	-0.367	0.113	0.00	0.30	0.000	18.50	58.84
20/10/2000	fin	-0.088	0.220	-0.172	0.107	0.02	0.18	0.235	18.74	59.59
29/11/2000	fin	0.121	0.033	0.045	0.058	0.06	0.04	0.000	18.74	59.59
27/12/2000	fin	-0.881	-0.096	-0.016	0.000	0.00	0.42	0.000	18.74	59.59
24/01/2001	fin	0.253	0.208	-0.171	-0.011	0.07	0.20	0.000	18.74	59.59
23/02/2001	fin	0.034	-0.079	0.004	0.034	0.00	0.05	0.000	18.74	59.59
07/06/2000	fmo	0.049	0.632	-0.360	-0.133	0.05	0.42	0.656	0.00	0.00
21/06/2000	fmo	-0.659	-0.247	-0.100	0.225	0.00	0.37	0.000	0.00	0.00
06/07/2000	fmo	-0.132	-0.562	-0.336	-0.357	0.00	0.18	0.000	0.00	0.00
19/07/2000	fmo	-0.321	0.016	0.647		0.11	0.49	1.482	1.48	4.80
01/08/2000	fmo	-0.014	0.310	0.602	-0.099	0.20	0.32	2.597	4.08	13.22
14/08/2000	fmo	0.536	0.064	0.019	0.379	0.25	0.25	3.245	7.32	23.73
28/08/2000	fmo	0.446	-0.272	0.000		0.06	0.36	0.812	8.14	26.36
10/09/2000	fmo	0.261	-0.204	-0.127	0.194	0.03	0.23	0.404	8.54	27.67
23/09/2000	fmo	-0.065	-0.563	0.121	-0.184	0.00	0.29	0.000	8.54	27.67
06/10/2000	fmo	0.085	0.022	0.089	0.034	0.06	0.03	0.748	9.29	30.09
20/10/2000	fmo	-0.047	0.145	-0.041	-0.003	0.01	0.09	0.190	9.48	30.71
29/11/2000	fmo	0.091	-0.230	0.148	-0.230	0.00	0.20	0.000	9.48	30.71
27/12/2000	fmo	-0.099	-0.404	-0.265	-0.156	0.00	0.13	0.000	9.48	30.71
24/01/2001	fmo	-0.022	-0.102	-0.046	-0.114	0.00	0.04	0.000	9.48	30.71
23/02/2001	fmo	-0.117	-0.406	0.034	0.047	0.00	0.21	0.000	9.48	30.71

trait	densité apparente	Qterre/ha (t)
te	1.62	3240
fin	1.59	3180
fmo	1.62	3240

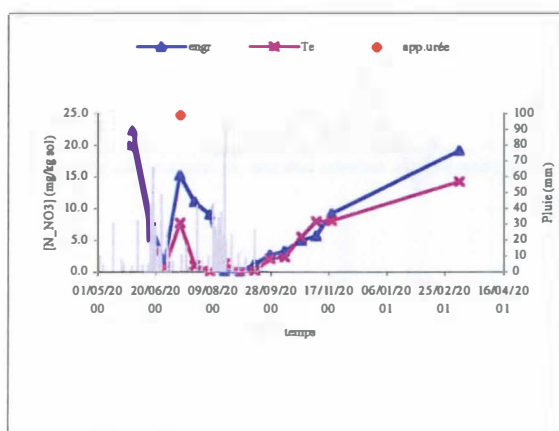
Annexe 3c : Dynamiques de N-NO_3^- (fig de gauche) et vitesses de nitrification (Vit nitrif) (fig. de droite) en milieu paysan.



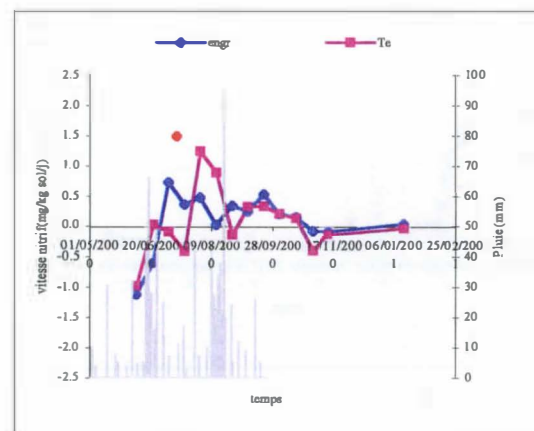
a



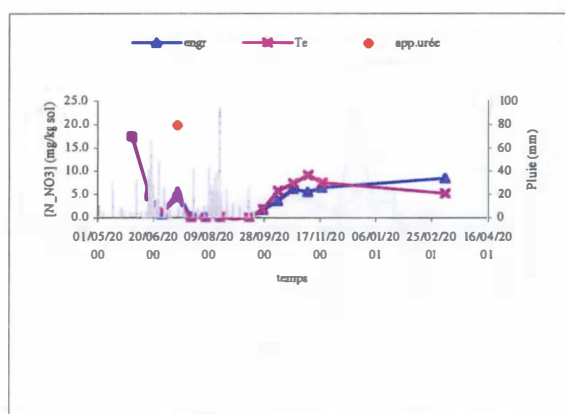
d



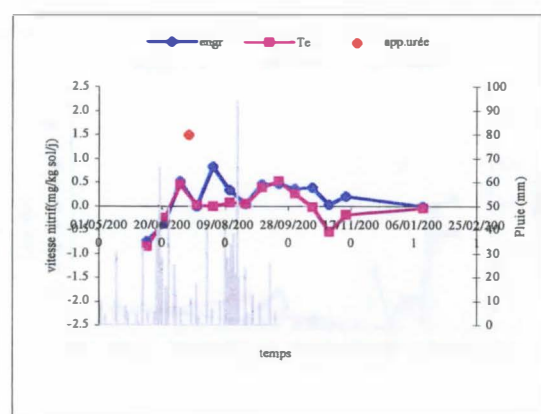
b



e



c



f

Figures de gauche :

Dynamiques de N-NO_3^- dans le sol d'un champ de case du haut d'une toposéquence :

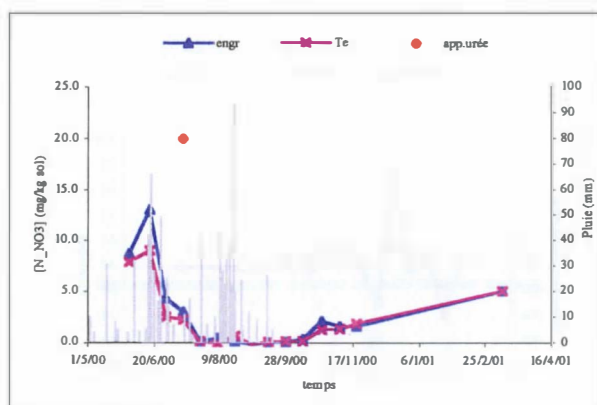
- a : producteur 1
- b : producteur 4
- c : producteur 6
- g : producteur 10
- h : producteur 15

Figures de droite :

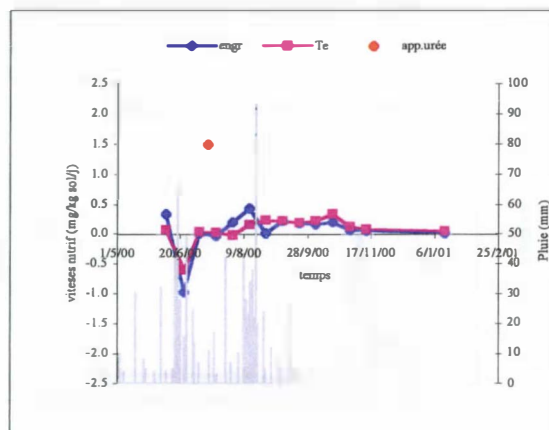
Vitesse de nitrification dans le sol d'un champ de case du haut d'une toposéquence :

- d : producteur 1
- e : producteur 4
- f : producteur 6
- i : producteur 10
- j : producteur 15

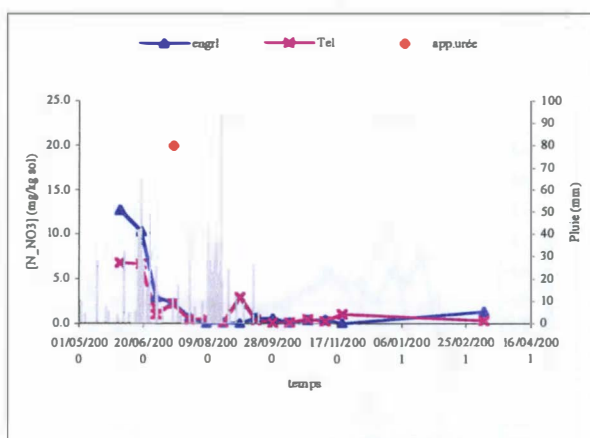
Annexe 3c, suite



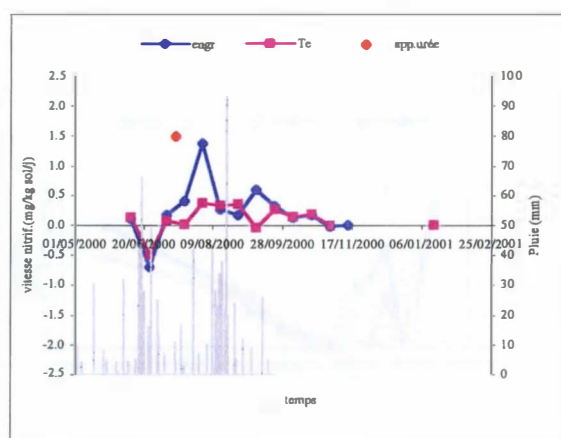
g



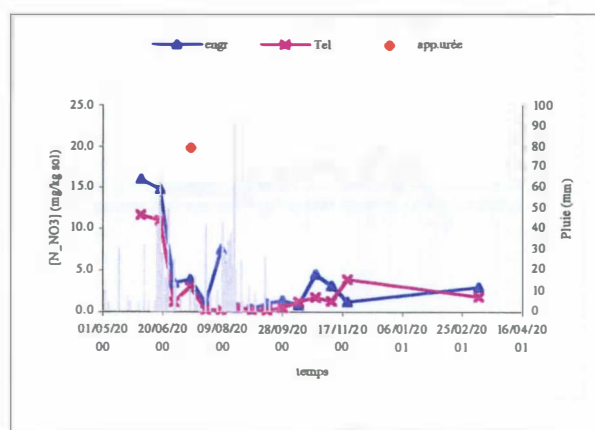
i



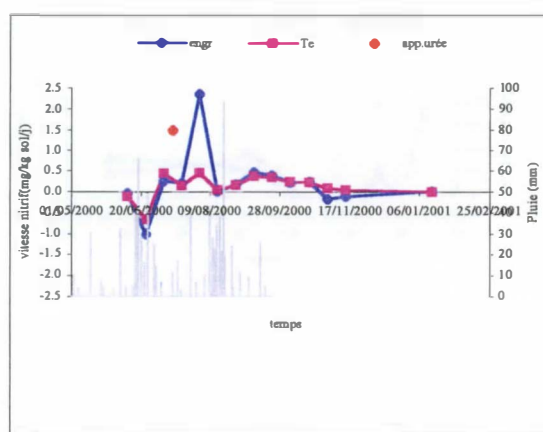
h



j

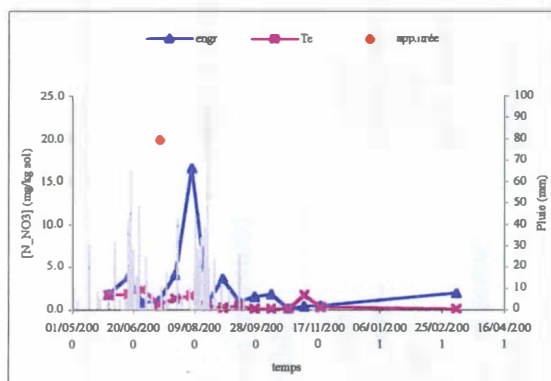


Dynamique de N-NO_3^- dans le sol d'un champ de case situé à mi-pente (Producteur 13)

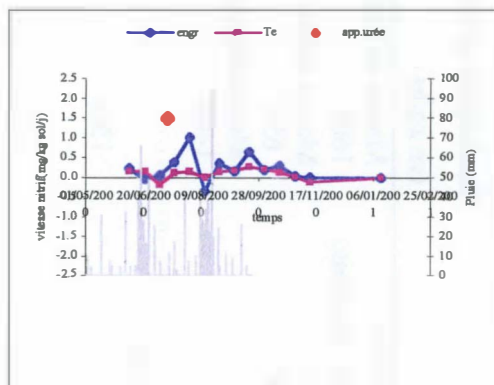


Vitesse de nitrification dans le sol d'un champ de case situé à mi-pente (Producteur 13)

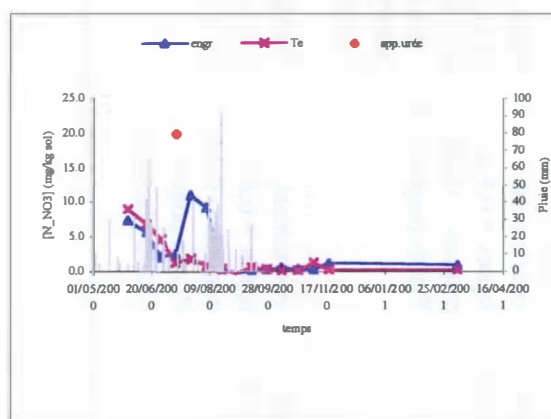
Annexe 3c, suite et fin



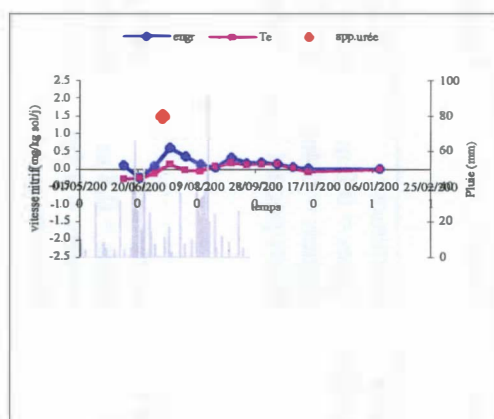
k



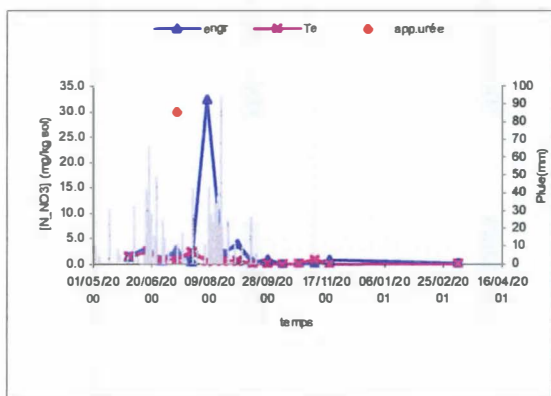
n



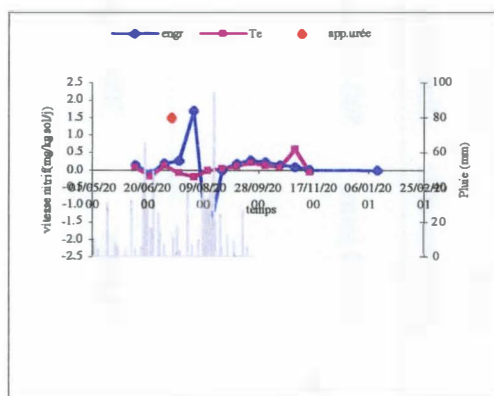
l



o



m



p

Figures de gauche : Dynamique de N-NO_3^- dans le sol d'un champ de brousse du haut d'une toposéquence

k : producteur 2

l : producteur 3

m : producteur 7

Figures de droite : Vitesse de nitrification dans le sol d'un champ de brousse du haut d'une toposéquence :

n : producteur 2

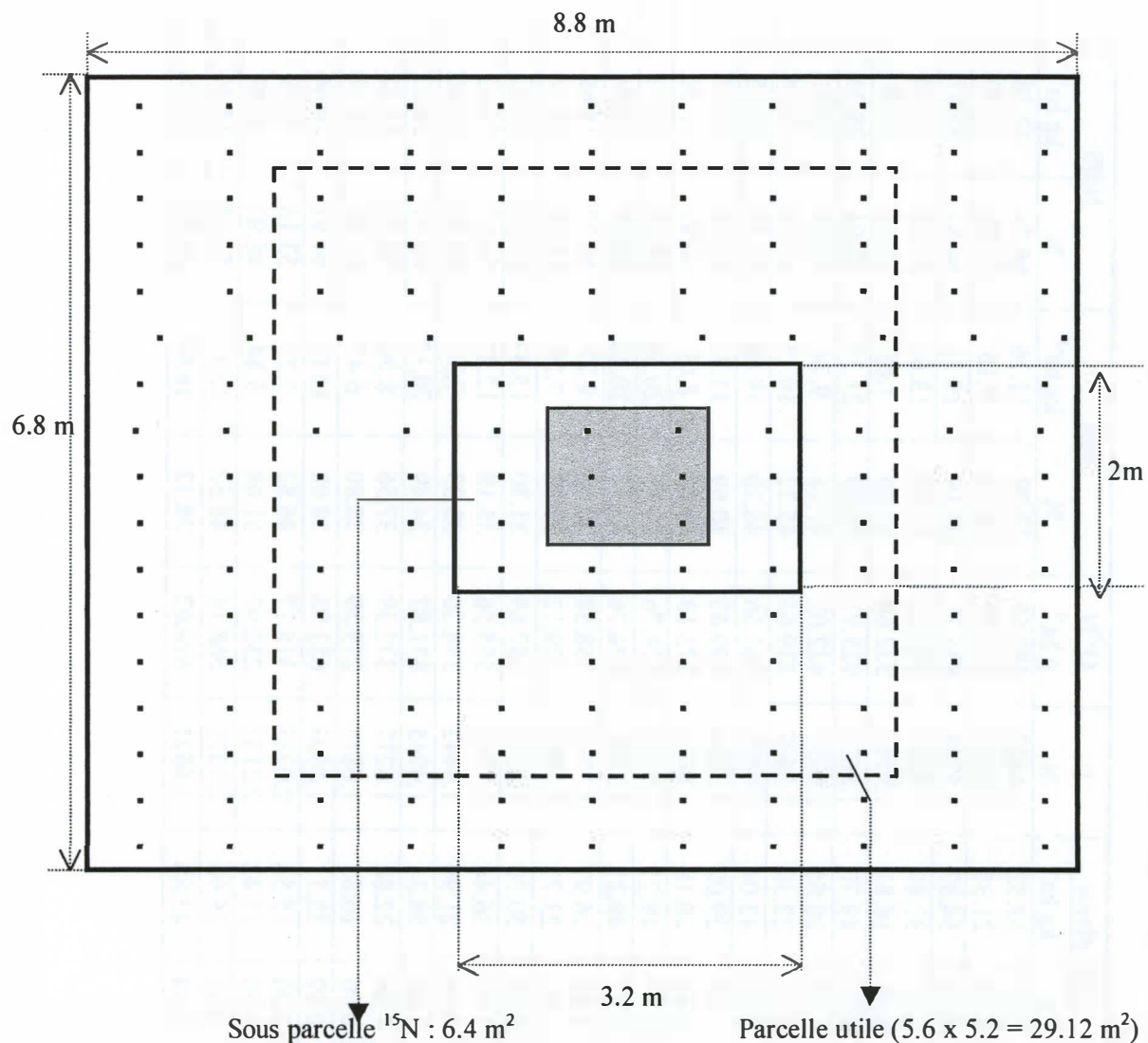
o : producteur 3

p : producteur 7

Annexe 4 : Fiches techniques des variétés de cultures utilisées dans les essais.

Noms	Origine	Provenance	Cycle semis-maturité	Zone climatique	Dates de semis	Densité	Fertilisation	Rendements grains (en kg/ha)
Mil IKMP5	INERA/ ICRISAT	Cultivar CVP170 du Nord Burkina	70-110 jours	500-800 mm	Mi-juin à début juillet	écartement : lignes = 0,8 m poquets = 0,4m Plants/poquet 2 à 3	100 kg ha ⁻¹ NPK+ 50 kg ha ⁻¹ urée au semis: 37-23-14-6-1 5t fumier ha ⁻¹	Moyen en station = 1600 Moyen milieu réel = 650 Max milieu réel = 1400
Niébé Kvx414-22-2	Burkina Faso	-	70 jours	300-1100 mm	Juillet à Août	écartement : lignes = 0,8 m poquets = 0,4m Plants/poquet = 2	100 kg ha ⁻¹ NPK au semis: 14-23-14-6-1	1500
Sorgho Sariaso 10	Burkina Faso	Synonyme BF83-3/48-21 CIRAD 378	120 jours	700-900 mm	15 juin au 10 juillet	écartement : lignes = 0,8 m poquets = 0,4m Plants/poquet = 3	100 kg ha ⁻¹ NPK+ 50 kg ha ⁻¹ urée au semis: 37-23-14-6-1 + 400 kg ha ⁻¹ BP : 200 P ₂ O ₅ ha ⁻¹ / 3ans + 5t fumier ha ⁻¹ /2ans	Potentiel = 4000 Moy. milieu réel = 1200 Performance./paysan = +11%
Maïs SR-21	Burkina Faso	-	120 jours	800-1100 mm	Juillet - 15 Août	écartement : lignes = 0,8 m poquets = 0,4m Plants/poquet 2 à 3 62500 plants/ha	200 kg ha ⁻¹ NPK+ 150 kg ha ⁻¹ urée au semis: 97-23-44-6-1	4200 à 5100

Annexe 5 : Plan d'une sous parcelle ^{15}N de sorgho, essai en station, Saria



Les points représentent les poquets. L'urée marquée est apportée sur la sous parcelle ^{15}N . La sous-parcelle ombrée ($1.6 \times 1.2 \text{ m} = 1.92 \text{ m}^2$) est celle récoltée pour la préparation des échantillons pour les différents dosages d'azote. Le rendement est évalué à partir de la parcelle utile.

Densité de semis : entre lignes : 80 cm ; entre poquets : 40 cm ; 2 plants par poquet.

Annexe 6 : Quantité et pourcentage de N engrais dans le sorgho à la récolte.

Traitements	Répétitions		MS kg ha ⁻¹	Ntot plante		e %	Q ¹⁵ N g ha ⁻¹	NdfF		NdfS		CRU %
				%	kg ha ⁻¹			%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	
fm	rep2	grains	2108.4	1.59	33.52	1.4427	483.65	33.29	11.16	66.71	22.36	18.79
		pailles	4965.2	0.43	21.35	1.6537	353.07	38.16	8.15	61.84	13.20	13.72
		Total	7073.6	0.78	54.87	1.5248	836.72	35.19	19.31	64.81	35.57	32.51
	rep3	grains	2178.1	1.51	32.89	1.8037	593.23	41.62	13.69	58.38	19.20	23.05
		pailles	4736.1	0.36	16.81	1.9787	332.68	45.66	7.68	54.34	9.14	12.92
		Total	6914.2	0.72	49.70	1.8629	925.91	42.99	21.37	57.01	28.34	35.97
	rep4	grains	1173.3	1.76	20.65	2.0437	422.02	47.16	9.74	52.84	10.91	16.40
		pailles	4224.2	0.53	22.39	1.9637	439.64	45.32	10.15	54.68	12.24	17.08
		Total	5397.5	0.80	43.04	2.0021	861.66	46.20	19.88	53.80	23.15	33.47
	rep5	grains	1819.9	1.62	29.02	1.7634	499.63	40.69	11.81	59.31	17.21	19.88
		pailles	4641.8	0.44	20.18	1.8654	375.13	43.05	8.69	56.95	11.50	14.63
		Total	6461.8	0.77	49.21	1.8050	874.76	41.65	20.50	58.35	28.71	34.50
	Moyenne fm		6461.8	0.77	49.21	1.7987	874.76	41.51	20.26	58.49	28.94	34.11
fmo	rep2	grains	1457.7	1.85	26.97	1.3297	358.58	30.68	8.27	69.32	18.69	13.93
		pailles	3890.8	0.61	23.73	1.3867	329.12	32.00	7.59	68.00	16.14	12.79
		Total	5348.4	0.95	50.70	1.3564	687.69	31.30	15.87	68.70	34.83	26.72
	rep3	grains	1868.6	1.95	36.44	1.5247	555.56	35.18	12.82	64.82	23.62	21.58
		pailles	3946.3	0.56	21.90	1.4442	316.30	33.33	7.30	66.67	14.60	12.29
		Total	5814.8	1.00	58.34	1.4945	871.87	34.49	20.12	65.51	38.22	33.87
	rep4	grains	1466.6	1.56	22.88	1.6277	372.39	37.56	8.59	62.44	14.28	14.47
		pailles	2987.3	0.56	16.63	1.6815	279.59	38.80	6.45	61.20	10.18	10.86
		Total	4453.9	0.89	39.51	1.6503	651.98	38.08	15.05	61.92	24.46	25.33
	rep5	grains	659.7	2.36	15.54	2.0287	315.17	46.82	7.27	53.18	8.26	12.24
		pailles	2285.5	0.50	11.43	2.2137	252.97	51.08	5.84	48.92	5.59	9.83
		Total	2945.2	0.92	26.96	2.1071	568.14	48.62	13.11	51.38	13.85	22.07
	Moyenne fmo		4640.6	0.94	43.88	1.6521	694.92	38.12	16.04	61.88	27.84	27.00

E % engrais = 4,3334

NF = 59,4 kg N ha⁻¹

Annexe 7 : Pourcentage de N immobilisé (NiS) dans le profil du sol exploitable par le sorgho (0-80cm).

Horizons cm	Répétitions	fmo					fm				
		Ntot sol		E %	Q ¹⁵ N g ha ⁻¹	NiS %	Ntot sol		E %	Q 15 N g ha ⁻¹	NiS %
		mg kg ⁻¹	kg ha ⁻¹				mg kg ⁻¹	kg ha ⁻¹			
0 - 20	2	256	767.20	0.0473	362.89	14.10	233	700.00	0.0631	441.70	17.16
	3	261	784.00	0.0544	426.23	16.56	224	672.00	0.0740	497.28	19.32
	4	420	1260.00	0.0414	521.64	20.27	229	866.13	0.0639	553.46	21.50
	5	317	952.00	0.0462	440.14	17.10	317	952.00	0.0547	520.74	20.23
Moyenne		314	940.80		437.73	17.01	229	746.04		497.48	19.55
20 - 30	2	261	418.13	0.0282	117.91	4.58	280	448.00	0.0164	73.47	2.85
	3	252	403.20	0.0346	139.51	5.42	252	403.20	0.0382	154.02	5.98
	4	373	597.33	0.0246	146.94	5.71	299	477.87	0.0337	161.04	6.26
	5	345	552.53	0.0254	140.34	5.45	327	522.67	0.0294	153.84	5.98
Moyenne		308	492.80		136.18	5.29	277	443.02		129.51	5.27
30 - 50	2	261	836.27	0.0199	166.42	6.47	271	866.13	0.0099	86.18	3.35
	3	280	896.00	0.0174	155.90	6.06	271	866.13	0.0186	161.10	6.26
	4	336	1075.20	0.0163	175.26	6.81	327	1045.33	0.0150	156.80	6.09
	5	317	1015.47	0.0129	131.00	5.09	261	836.27	0.0145	121.40	4.72
Moyenne		299	955.73		157.14	6.10	289	925.87		134.69	5.10
50 - 80	2	233	1120.00	0.0169	189.28	7.35	215	1030.40	0.0093	95.83	3.72
	3	246	1179.20	0.0225	265.32	10.31	205	985.60	0.0116	114.33	4.44
	4	243	1164.80	0.0162	188.70	7.33	210	1008.00	0.0169	170.35	6.62
	5	261	1254.40	0.0120	150.53	5.85	224	1075.20	0.0126	135.48	5.26
Moyenne		246	1179.60		198.46	7.71	210	1008.00		126.84	5.01
Total (0 - 80)						36.11					34.94

E engrais (%) = 4,3334

NF = 59,4 kg.ha⁻¹

da = 0 - 20 : 1,50

20 - 80 : 1,60

Analyses statistiques de l'annexe 6 : logiciel GENSTAT 5

Traitements	MS	Ntot.plante	NdfF		NdfS		CRU
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%
ppds (5%)	1877	17.75	11.48	4.09	11.4	8	16.33
C.V. %	15.0	19.3	12.8	10	8.5	25.6	10
Signification (5%)	NS	NS	NS	S	NS	NS	S

Analyses statistiques de l'annexe 7 : logiciel GENSTAT 5

	Ntot sol		E	Q ¹⁵ N	NiS
	mg kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	g ha ⁻¹	%
CV	10.6	9.9	12.7	12.5	12.5
signif. Traitement	S	HS	NS	NS	NS
signif. Horizon	HS	HS	HS	HS	HS
signif trait-horizon	NS	NS	HS	HS	HS

Annexe 8 : Les pertes de N engrais hors du système sol-plante

Traitements	Répétitions	CRU %	NiS %	Nis %	Pertes N (1)		Pertes N (2)	
					%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹
fm	2	32.51	27.09	20.01	40.41	24.0	47.48	28.2
	3	35.97	36.00	25.30	28.03	16.6	38.73	23.0
	4	33.47	40.47	27.76	26.06	15.5	38.77	23.0
	5	34.50	36.19	26.21	29.31	17.4	39.29	23.3
	moyenne	34.11	34.94	24.82	30.95	18.4	41.07	24.4
fmo	2	26.72	32.50	17.37	40.79	24.2	55.92	33.2
	3	33.87	38.34	21.98	27.79	16.5	44.15	26.2
	4	25.33	40.11	25.97	34.56	20.5	48.70	28.9
	5	22.07	33.49	22.55	44.44	26.4	55.38	32.9
	moyenne	27.00	36.11	21.97	36.89	21.9	51.03	30.3
C.V		9.7	12.5	14.6	17.2	17.2	9.7	9.7
Signification 5%		S	NS	HS	NS	NS	S	S

E % engrais = 4,3334

NF = 59,4 kg N ha⁻¹

d.a = 0 - 20 : 1,50

20 - 80 : 1,60

Nis % = azote immobilisé dans l'horizon 0 - 20 cm.

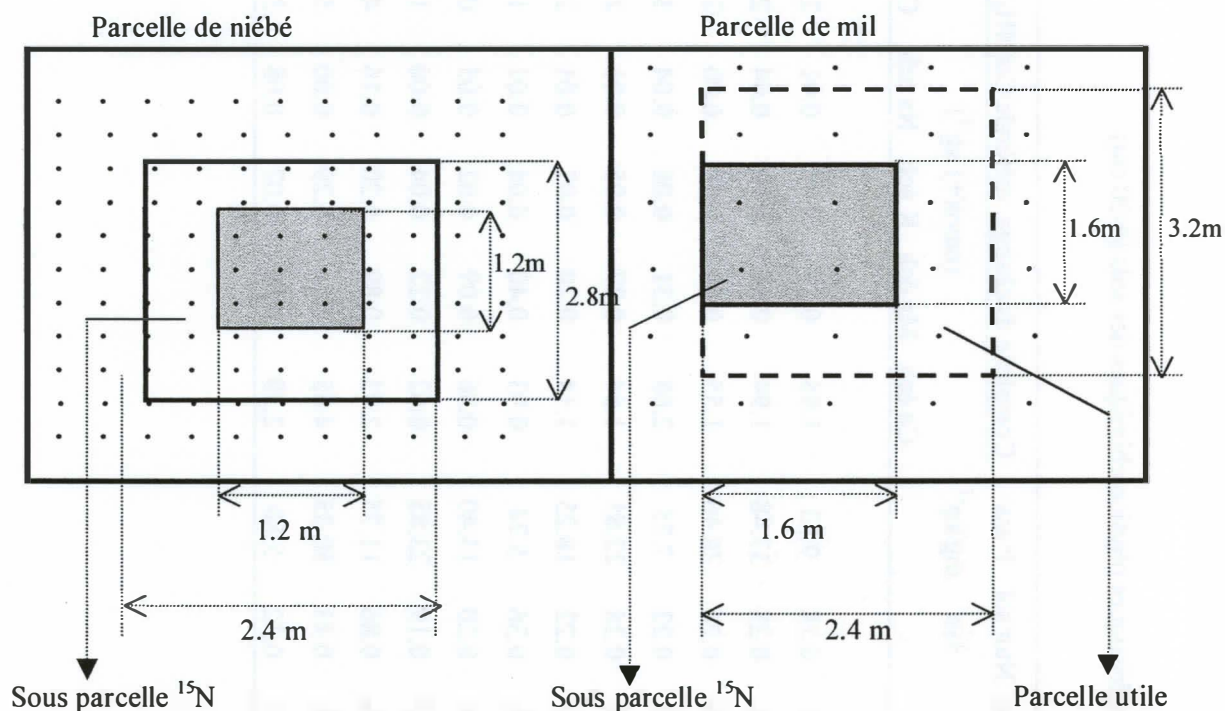
PertesN (1) = 100 - (CRU + NiS) ; pertes globales hors du système sol-plante,

PertesN (2) = 100 - (CRU + Nis); pertes dans l'atmosphère, partant de l'hypothèse que les pertes par lixiviation sont faibles et, nulles par ruissellement.

Annexe 9 : Caractéristiques physico-chimiques des sols (0-20 cm)

Référence	Argile %	Sable %	pH H ₂ O	MOS %	C org. %	Ntot sol ‰	P ass mg kg ⁻¹	Complexe d'échange, méthode Co(NH ₃) ₆ Cl ₃					Saturation
								(cmol(+) kg ⁻¹)					
								Ca éch	Mg éch	K éch	Na éch	CEC	
essai longue durée :													
tea	11.23	62.83	6.75	0.39	0.23	0.18	9.33	1.95	0.29	0.08	0.01	2.75	83.89
fmoa	10.48	63.55	6.41	0.55	0.32	0.28	37.48	1.94	0.36	0.10	0.04	2.90	83.23
fma	12.83	58.68	5.74	0.46	0.27	0.26	28.46	1.55	0.23	0.08	0.00	2.42	77.25
tec	13.95	59.75	6.41	0.44	0.25	0.22	7.75	2.08	0.31	0.06	0.04	3.05	80.92
fmoc	11.03	65.35	6.25	0.53	0.31	0.28	22.85	1.64	0.27	0.05	0.01	2.53	77.89
fmc	11.70	62.53	5.64	0.46	0.27	0.22	18.25	1.14	0.20	0.07	0.01	2.09	67.94
Jachère	5.68	66.23	6.09	0.74	0.43	0.36	5.74	0.93	0.40	0.04	0.01	1.91	71.84
Saria haut	1.30	77.70	5.60	0.45	0.26	0.20	13.40	0.36	0.09	0.02	0.05	0.72	73.40
Saria mi-pente	5.80	71.30	5.50	0.38	0.22	0.19	23.85	0.62	0.22	0.04	0.00	1.14	76.80
Saria bas-pente	30.10	18.60	5.45	1.66	0.96	0.86	11.75	2.43	0.89	0.20	0.16	4.84	75.87
Champ de case	7.90	78.10	8.25	0.95	0.55	0.43	50.35	4.65	0.64	0.29	0.00	5.78	96.56
Champ de brousse	9.10	64.60	6.45	0.88	0.51	0.32	5.80	2.29	0.60	0.07	0.08	3.62	83.90

Annexe 10 : Plan d'une sous parcelle ^{15}N (mil et niébé), essai fixation de N_2 par le niébé.



Les points représentent les poquets. L'urée marquée est apportée sur les sous parcelles ^{15}N . Les sous parcelles ombrées sont celles récoltées pour la préparation des échantillons pour les différents dosages d'azote. Le rendement est évalué à partir de la parcelle ^{15}N pour le niébé, et à partir de la parcelle utile pour le mil.

Densité de semis : entre lignes :

- niébé : 40 cm entre lignes ; 40 cm ; entre poquets ; 2 plants par poquet.
- mil : 80 cm entre les lignes et, 80 cm entre les poquets, 2 plants par poquet.

Annexe 11 : NdfF (% et en kg ha⁻¹) et Asol (kg ha⁻¹) relatifs à la plante non nodulante, mil (*Pennisetum thyphoides*).

Traitements	Répétitions		MS kg ha ⁻¹	Ntot plante		e %	Q ¹⁵ N g ha ⁻¹	NdfF		Asol kg.ha ⁻¹
				%	kg ha ⁻¹			%	kg ha ⁻¹	
fm	rep2	grains	1883.0	1.94	36.44	0.2926	106.61	29.65	10.80	
		pailles	4373.0	1.08	47.23	0.2563	121.05	25.97	12.27	
		Total	6256.0	1.34	83.66	0.2721	227.66	27.57	23.07	260.07
	rep3	grains	1132.0	2.28	25.81	0.2920	75.36	29.59	7.64	
		pailles	6461.0	0.83	53.63	0.2839	152.25	28.77	15.43	
		Total	7593.0	1.05	79.44	0.2865	227.61	29.03	23.06	241.99
	rep4	grains	952.0	2.64	25.13	0.2722	68.41	27.58	6.93	
		pailles	5152.0	0.90	46.37	0.2844	131.87	28.82	13.36	
		Total	6104.0	1.17	71.50	0.2801	200.28	28.38	20.29	249.81
	rep5	grains	1342.0	2.29	30.66	0.3283	100.66	33.26	10.20	
		pailles	4848.0	0.75	36.36	0.3442	125.15	34.88	12.68	
		Total	6190.0	1.08	67.02	0.3369	225.81	34.14	22.88	191.01
	Moyenne fm		6535.8	1.16	75.41	0.2939	220.34	29.78	22.33	235.72
fmo	rep2	grains	958.6	2.10	20.13	0.2972	59.83	30.12	6.06	
		pailles	7460.9	0.95	70.88	0.2431	172.31	24.63	17.46	
		Total	8419.5	1.08	91.0	0.2551	232.1	25.8	23.5	284.06
	rep3	grains	1686.0	1.93	32.54	0.2476	80.57	25.09	8.16	
		pailles	6483.0	2.33	151.05	0.2877	434.58	29.15	44.04	
		Total	8169.0	2.25	183.59	0.2806	515.15	28.43	52.20	249.21
	rep4	grains	1915.0	1.91	36.58	0.2363	86.43	23.94	8.76	
		pailles	9511.0	0.61	58.02	0.2499	144.98	25.32	14.69	
		Total	11426.0	0.83	94.59	0.2432	230.09	24.65	23.32	302.68
	rep5	grains	1646.0	2.12	34.90	0.4036	140.82	40.89	14.27	
		pailles	3862.0	0.74	28.58	0.3564	101.85	36.11	10.32	
		Total	5508.0	1.15	63.47	0.3823	242.68	38.74	24.59	156.55
	Moyenne fmo		8380.6	1.33	108.17	0.2903	305.01	29.42	30.91	248.13

E% engrais = 0.9869

NF = 99 kg ha⁻¹

Q¹⁵N : Quantité de N engrais dans la plante

Annexe 11₁ : NdfF (% et en kg ha⁻¹) et Asol+fix (kg ha⁻¹) relatifs à la plante nodulante, niébé (*Vigna inguiculata*), variété KVx 414-22-2

Traitements	Répétitions		MS kg ha ⁻¹	Ntotal		e %	Q ¹⁵ N g ha ⁻¹	NdfF		Asol+fix kg ha ⁻¹
				%	kg ha ⁻¹			%	kg ha ⁻¹	
fm	rep2	grains	825.22	2.90	23.97	0.2904	69.61	5.56	1.33	
		pailles	1608.65	1.17	18.82	0.2593	48.80	4.97	0.93	
		Total	2433.87	1.76	42.79	0.2767	118.41	5.30	2.27	353.84
	rep3	grains	897.22	3.02	27.08	0.3018	81.72	5.78	1.56	
		pailles	1360.42	1.62	22.04	0.2600	57.30	4.98	1.10	
		Total	2257.64	2.18	49.12	0.2651	130.19	5.08	2.49	370.29
	rep4	grains	784.00	3.03	23.72	0.3026	71.79	5.79	1.37	
		pailles	1446.53	1.59	23.00	0.2932	67.43	5.61	1.29	
		Total	2230.53	2.09	46.72	0.2950	137.85	5.65	2.64	330.66
	rep5	grains	794.44	2.67	21.20	0.2669	56.59	5.11	1.08	
		pailles	2019.00	2.07	41.79	0.2247	93.92	4.30	1.80	
		Total	2813.44	2.24	63.00	0.2272	143.12	4.35	2.74	435.33
	Moyenne		2433.87	2.07	50.41	0.2660	132.39	5.09	2.54	372.53
fmo	rep2	grains	1016.67	2.90	29.48	0.2361	69.61	4.52	1.33	
		pailles	1846.53	1.03	19.02	0.2202	41.88	4.22	0.80	
		Total	2863.19	1.69	48.50	0.2222	107.77	4.25	2.06	444.50
	rep3	grains	1255.56	4.24	53.24	0.1727	91.94	3.31	1.76	
		pailles	1872.22	1.86	34.82	0.2010	70.00	3.85	1.34	
		Total	3127.78	2.82	88.06	0.1972	173.64	3.78	3.33	503.37
	rep4	grains	1152.00	4.30	49.54	0.2345	116.16	4.49	2.22	
		pailles	1554.17	1.87	29.06	0.2037	59.20	3.90	1.13	
		Total	2706.17	2.90	78.60	0.2067	162.44	3.96	3.11	479.38
	rep5	grains	1152.08	2.96	34.10	0.3758	128.15	7.20	2.45	
		pailles	2213.00	1.59	35.11	0.2083	73.15	3.99	1.40	
		Total	3365.08	2.06	69.21	0.3758	260.11	7.20	4.98	255.35
	Moyenne		3015.6	2.37	71.09	0.2505	175.99	4.80	3.37	420.65

E % engrais = 5,2222

NF = 19,8 kg ha⁻¹

Annexe 11₂ : Quantité et Pourcentage de N trouvés dans les parties aériennes de la plante de niébé provenant de la fixation symbiotique de N₂ (NdfFix) (synthèse des annexes 11 et 11₁)

Traitements	Répétitions	MS kg ha ⁻¹	Ntotal plante		NdfF		Valeur A			NdfFix	
			%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	sol+fix (niébé) kg ha ⁻¹	sol (mil) kg ha ⁻¹	fixation kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹
fm	2	2433.9	1.76	42.79	5.30	2.27	353.8	260.1	93.8	25.10	10.74
	3	2257.6	2.18	49.12	5.08	2.49	370.3	242.0	128.3	32.89	16.15
	4	2230.5	2.09	46.72	5.65	2.64	330.7	249.8	80.9	23.07	10.78
	5	2813.4	2.24	63.00	4.35	2.74	435.3	191.0	244.3	53.68	33.82
	moyenne	2433.87	2.07	50.41	5.09	2.54	372.53	235.72	136.81	33.68	17.87
fmo	2	2863.2	1.69	48.50	4.25	2.06	444.5	284.1	160.4	34.48	16.72
	3	3127.8	2.82	88.06	3.78	3.33	503.4	249.2	254.2	48.47	42.68
	4	2706.2	2.90	78.60	3.96	3.11	479.4	302.7	176.7	35.32	27.76
	5	3365.1	2.06	69.21	7.20	4.98	255.3	156.6	98.8	35.91	24.85
	moyenne	3015.6	2.36	71.09	4.42	3.37	420.7	248.1	172.5	38.54	28.00
ppds (seuil 5%)		316.3	1.02	30.16	5.02	1.94	242.5	58.04	193.9	29.25	24.34
C.V		9.6	18.9	20.6	18.7	25.7	9.7	19.6	18.6	18	27.9
Signification		HS	S	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

E % engrais = 5,2222

NF = 19,8 kg ha⁻¹

Les analyses statistiques sont faites avec le logiciel GENSTAT, version 5

Annexe 12₁ : Caractéristiques physico-chimiques des sols en milieu paysan

Sites	groupe	type	N-NH ₄ ⁺ depart		N-NO ₃ ⁻ depart		Nav-net	Argiles	Limons fins	Limons gros.	Sables fins	Sables gros.	pH H ₂ O	pH KCl
	fertilité	champ	mg	kg ⁻¹ sol sec	mg	kg ⁻¹ sol sec	mg N kg ⁻¹ sol sec	%	%	%	%	%		
2	1	cc	1.82		7.35		7.28	13.1	4.7	12.1	25.7	44.3	7.15	6.15
7	1	cc	2.39		25.34		11.50	10.1	8.3	15.6	30.2	35.8	6.95	6.10
9	1	cc	7.54		18.52		29.90	7.5	3.2	16.0	28.9	44.5	6.80	6.10
16	1	cc	1.89		46.30		1.97	4.9	5.5	15.4	31.3	42.9	7.80	7.15
18	1	cc	1.60		9.82		1.35	6.2	6.5	13.2	29.1	45.0	8.15	7.55
20	1	cc	2.02		11.15		6.14	9.7	4.4	9.5	27.5	49.0	8.25	7.50
24	1	cc	2.74		28.98		22.30	10.7	8.4	12.7	28.5	39.7	8.00	7.30
3	2	cb	2.72		13.38		15.51	7.9	2.6	9.5	26.7	53.3	5.95	5.15
5	2	cb	1.69		11.17		9.71	8.5	5.0	13.8	26.4	46.2	6.15	5.40
6	2	cb	1.62		2.44		9.30	8.5	6.7	18.9	24.4	41.5	6.35	5.35
14	2	cb	1.58		7.96		6.66	6.1	9.5	13.9	23.8	46.7	6.15	5.30
17	2	cb	1.75		5.47		5.53	4.2	2.9	8.9	20.0	64.0	6.35	5.35
19	2	cb	1.62		6.04		8.65	5.5	4.2	10.2	21.4	58.9	6.55	5.65
22	2	cc	2.41		7.83		-	4.3	6.5	14.3	26.3	48.6	6.00	5.00
1	3	cc	15.76		31.63		25.97	5.2	4.9	15.1	28.9	45.9	6.90	6.05
4	3	cc	2.17		8.83		3.10	1.8	3.8	14.9	24.7	54.8	7.85	7.10
8	3	cc	1.95		17.68		5.46	3.6	4.6	15.4	34.4	41.9	6.75	6.00
10	3	cc	2.50		13.98		5.43	5.8	3.7	11.6	42.3	36.5	6.85	6.00
11	3	ci	1.75		14.11		3.33	7.4	5.3	13.5	32.4	41.3	6.40	5.55
12	3	cc	3.22		6.99		3.66	3.9	5.2	11.8	28.4	50.6	7.00	6.10
13	3	ci	3.09		16.46		15.48	10.8	8.2	14.4	24.9	41.7	7.50	6.85
23	3	cc	1.71		11.95		5.85	8.3	8.8	15.5	26.9	40.6	6.60	5.65
25	3	cc	1.73		11.06		16.72	2.5	5.1	11.1	26.8	54.2	6.50	5.60
26	3	cc	3.66		18.83		18.33	2.9	3.7	11.9	30.2	51.3	6.35	5.50

Cb : champ de brousse ; Cc : champ de case ; Ci : champ intermédiaire

Nav : N minéralisable par la méthode Waring-Bremner

Annexe 12₁, suite et fin

Sites	Groupe de fertilité	Type de champ	MOS %	C org. %	Ntot sol g kg ⁻¹ sol	C/N	Passim. mg P/100g	Ca éch cmol (+) kg ⁻¹	Mg éch cmol (+) kg ⁻¹	K éch cmol (+) kg ⁻¹	Na éch cmol (+) kg ⁻¹	CEC cmol (+) kg ⁻¹	Saturation	pH extraitCo
2	1	cc	0.73	0.43	0.31	13.64	66.2	3.68	0.92	0.31	0.03	5.60	0.89	6.26
7	1	cc	1.16	0.67	0.54	12.51	14.2	3.62	0.80	0.30	0.02	5.06	0.94	6.26
9	1	cc	1.11	0.64	0.54	11.94	17.1	3.06	0.78	0.32	0.03	4.65	0.91	5.50
16	1	cc	0.71	0.41	0.37	11.10	35.1	2.97	0.66	0.66	0.03	4.33	1.00	6.21
18	1	cc	0.90	0.52	0.37	14.06	76.2	4.56	0.43	0.24	0.02	5.26	1.00	6.97
20	1	cc	1.03	0.60	0.41	14.61	58.5	4.69	0.59	0.22	0.02	4.82	1.14	7.15
24	1	cc	1.33	0.77	0.63	12.15	42.7	5.61	0.82	0.43	0.03	7.06	0.98	6.94
3	2	cb	0.67	0.39	0.29	13.23	7.6	1.41	0.46	0.08	0.02	1.99	0.99	5.66
5	2	cb	0.70	0.40	0.29	14.11	5.3	1.58	0.46	0.10	0.01	2.24	0.96	5.76
6	2	cb	0.69	0.40	0.26	15.18	6.7	1.22	0.37	0.06	0.00	1.82	0.91	5.74
14	2	cb	0.66	0.38	0.24	16.10	4.9	1.76	0.47	0.08	0.02	2.76	0.88	5.49
17	2	cb	0.46	0.26	0.17	15.25	5.8	0.97	0.32	0.06	0.01	1.39	0.98	5.93
19	2	cb	0.53	0.31	0.21	14.87	6.1	1.28	0.46	0.08	0.01	2.15	0.89	5.86
22	2	cc	0.62	0.36	0.26	13.98	6.7	1.93	0.54	0.08	0.00	2.57	1.00	5.81
1	3	cc	0.89	0.52	0.49	10.58	19.3	2.60	0.65	0.33	0.02	3.47	1.04	6.42
4	3	cc	0.45	0.26	0.22	11.90	11.2	1.36	0.35	0.27	0.01	1.93	1.03	6.57
8	3	cc	0.58	0.34	0.24	13.83	9.7	1.88	0.52	0.19	0.01	2.54	1.03	6.12
10	3	cc	0.54	0.31	0.26	12.02	10.2	1.72	0.60	0.11	0.01	2.40	1.01	6.04
11	3	ci	0.52	0.30	0.25	12.20	6.7	1.75	0.51	0.22	0.04	2.87	0.89	5.45
12	3	cc	0.64	0.37	0.28	13.04	10.5	2.48	0.46	0.21	0.01	3.63	0.88	5.64
13	3	ci	0.76	0.44	0.38	11.72	15.4	2.77	0.46	0.21	0.01	3.65	0.95	5.93
23	3	cc	0.57	0.33	0.28	11.95	5.4	2.07	0.53	0.11	0.03	3.23	0.86	5.87
25	3	cc	0.32	0.19	0.15	12.73	7.5	1.01	0.23	0.11	0.02	1.23	1.11	6.13
26	3	cc	0.88	0.51	0.42	11.99	10.7	1.59	0.41	0.29	0.02	2.19	1.05	6.02

Annexe 12₂ : NdfF (% et kg ha⁻¹) et CRU % en milieu paysan, essais maïs

Sites	Matière sèche parties aériennes (MS)						Ntot plante 80N						e (Excès isotopique)						NdfF plante				CRU	
	grains kg ha ⁻¹		pailles kg ha ⁻¹		total kg ha ⁻¹		grains %		pailles %		total kg ha ⁻¹		grains %		pailles %		plante %		%		kg ha ⁻¹		%	
	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép.1	rép.2
1	5935.0	10306	7581.8	11741	13517	22047	1.19	1.62	1.03	0.46	148.7	221.0	0.135	0.108	0.150	0.156	0.143	0.120	27.97	23.45	41.6	51.8	52.18	65.00
2	1397.2	1665.8	3568.8	3078.6	4966.0	4744	1.20	1.25	0.53	0.57	35.7	38.4	0.114	0.245	0.125	0.207	0.120	0.228	23.41	44.57	8.4	17.1	10.48	21.45
3	809.7	1064.7	4435.5	4386.4	5245.2	5451	1.30	1.30	0.91	0.90	50.9	53.3	0.257	0.163	0.260	0.180	0.259	0.176	50.81	34.40	25.9	18.3	32.43	23.00
4	3220.0	3660.3	5191.0	5839.1	8411.0	9499	1.97	1.61	0.62	0.69	95.6	99.2	0.250	0.268	0.254	0.269	0.251	0.269	49.24	52.59	47.1	52.2	59.05	65.45
5	911.2	873.8	4012.4	4751.9	4923.5	5626	1.74	1.61	0.68	0.52	43.2	38.8	0.312	0.241	0.247	0.247	0.270	0.245	52.97	47.92	22.9	18.6	28.68	23.31
6	1237.4	1430.0	3719.6	3832.3	4957.0	5262	1.69	1.49	0.83	0.67	51.7	47.0	0.303	0.296	0.299	0.293	0.301	0.295	58.89	57.70	30.5	27.1	38.22	34.00
7	5658.8	4052.7	8506.7	6145.0	14165	10198	1.37	1.20	0.45	0.39	115.8	72.6	0.096	0.082	0.127	0.108	0.106	0.091	20.83	17.75	24.1	12.9	30.26	16.17
8	4839.7	2925.2	6896.7	5413.8	11736	8339	1.07	1.07	0.40	0.40	79.4	53.0	0.196	0.196	0.198	0.198	0.196	0.197	38.48	38.51	30.5	20.4	38.31	25.58
9	8101.9	8848.1	10876.4	11250	18978	20098	1.19	1.36	0.34	0.39	133.4	164.2	0.084	0.116	0.123	0.157	0.095	0.127	18.60	24.82	24.8	40.8	31.13	51.13
10	2089.4	4540.4	5877.9	8094.7	7967.3	12635	1.47	1.40	0.34	0.37	50.7	93.5	0.186	0.210	0.200	0.220	0.191	0.213	37.45	41.77	19.0	39.1	23.81	48.99
11	2935.7	1076.9	3654.2	3048.6	6590.0	4125	1.51	1.56	0.64	0.58	67.7	34.5	0.073	0.154	0.105	0.173	0.084	0.164	16.44	32.10	11.1	11.1	13.96	13.88
12	2796.3	4394.3	4833.5	7163.8	7629.8	11558	1.50	1.25	0.40	0.45	61.3	87.2	0.117	0.148	0.143	0.160	0.125	0.152	24.51	29.76	15.0	25.9	18.84	32.53
13	3006.0	2663.8	4263.1	5098.8	7269.1	7763	1.29	1.44	0.59	0.66	63.9	72.0	0.086	0.090	0.116	0.119	0.098	0.104	19.12	20.32	12.2	14.6	15.33	18.35
14	2901.2	2192.2	7228.4	5899.2	10130	8091	1.47	1.55	0.54	0.50	81.7	63.5	0.307	0.267	0.298	0.280	0.303	0.273	59.36	53.43	48.5	33.9	60.81	42.53
15	4224.6	4745.3	11299.2	10551	15524	15296	1.46	1.39	0.43	0.47	110.3	115.5	0.139	0.133	0.160	0.155	0.148	0.142	29.01	27.84	32.0	32.2	40.12	40.35
16	7887.5	6770.7	9861.1	8630.8	17749	15401	1.55	1.59	0.89	0.81	210.0	177.6	0.066	0.208	0.099	0.218	0.080	0.212	15.61	41.48	32.8	73.6	41.12	92.37
17	105.5	7.6	1992.6	1345.8	2098.1	1353	2.21	2.11	1.05	1.05	23.3	14.3	0.337	0.320	0.328	0.313	0.328	0.313	64.33	61.32	15.0	8.8	18.76	10.99
18	1759.9	1389.1	4998.9	3662.9	6758.8	5052	1.47	1.80	0.52	0.81	51.9	54.7	0.080	0.094	0.096	0.096	0.088	0.095	17.25	18.60	8.9	10.2	11.22	12.76
19	592.2	1343.7	3435.9	4367.0	4028.1	5711	1.78	2.17	1.07	0.62	47.3	56.2	0.228	0.265	0.235	0.267	0.233	0.266	45.70	52.03	21.6	29.3	27.11	36.70
20	3989.2	2097.1	6905.4	4655.6	10895	6753	1.23	1.33	0.39	0.47	76.0	49.8	0.124	0.124	0.142	0.142	0.131	0.132	25.57	25.86	19.4	12.9	24.37	16.14
21	768.0	1743.2	4364.4	5290.1	5132.4	7033	1.73	1.35	0.68	0.68	43.0	59.5	0.226	0.226	0.234	0.234	0.231	0.230	45.26	45.13	19.4	26.9	24.39	33.69
22	2305.3	7811.8	4750.2	6723.2	7055.5	14535	1.74	1.41	0.71	0.49	73.8	143.1	0.033	0.076	0.071	0.107	0.050	0.083	9.76	16.20	7.2	23.2	9.04	29.07
23	3944.6	5586.9	8244.3	8992.3	12189	14579	1.23	1.54	0.33	0.40	75.7	122.0	0.084	0.073	0.114	0.104	0.095	0.082	18.61	16.07	14.1	19.6	17.68	24.59
24	5176.6	5714.4	9620.4	8799.9	14797	14514	1.31	1.23	0.61	0.65	126.5	127.5	0.101	0.128	0.128	0.151	0.113	0.139	22.18	27.15	28.1	34.6	35.19	43.41
25	2444.9	4939.1	4970.0	7717.6	7415	12657	1.64	1.49	0.64	0.44	71.9	107.6	0.167	0.184	0.184	0.199	0.175	0.189	34.19	36.97	24.6	39.8	30.83	49.88
26	3654.8	5987.3	8819.8	6798.3	12475	12786	1.68	1.41	0.82	0.81	133.8	139.3	0.076	0.193	0.107	0.206	0.093	0.198	18.17	38.72	24.3	53.9	30.50	67.63
27	2734.3	2380.4	5341.2	3902.4	8075.5	6283	1.34	1.67	0.76	0.79	77.0	70.5	0.139	0.104	0.160	0.131	0.150	0.115	29.38	22.62	22.6	15.9	28.36	19.99

E % engrais = 0.5106

NF = 79.73 kg N ha⁻¹

Annexe 12₃ : NdfS (kg ha⁻¹) et CAU % en milieu paysan, essais maïs

Sites	MS totale 0N.						Ntot plante 0N				MS total 80N.		Ntot plante 80N				NdfF		NdfS		CAU
	grains		pailles		totale																
	kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹		%		kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹		%		kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹		
	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	rép1	rép2	
1	3654.8	9746.21	4921.8	10202.2	8576.6	19948.4	1.02	1.05	87.9	210.4	13516.7	22047.0	1.10	1.00	148.7	221.0	41.6	51.8	107.1	169.1	44.78
2	213.0	1061.9	1278.3	2759.6	1491.4	3821.5	0.78	0.96	11.6	36.7	4966.0	4744.4	0.72	0.81	35.7	38.4	8.4	17.1	27.3	21.3	16.16
3	182.3	324.479	1813.5	2581.03	1995.8	2905.51	0.85	0.92	17.0	26.8	5245.2	5451.0	0.97	0.98	50.9	53.3	25.9	18.3	25.0	35.0	37.85
4	2577.0	2706.47	4127.5	4065.48	6704.5	6771.95	1.01	1.01	67.7	68.5	8411.0	9499.4	1.14	1.04	95.6	99.2	47.1	52.2	48.5	47.0	36.77
5	69.0	30.1339	1106.7	1655.36	1175.7	1685.49	0.70	0.81	8.2	13.7	4923.5	5625.7	0.88	0.69	43.2	38.8	22.9	18.6	20.3	20.2	37.67
6	391.8	232.813	1859.9	1811.24	2251.7	2044.05	0.88	0.86	19.8	17.5	4957.0	5262.3	1.04	0.89	51.7	47.0	30.5	27.1	21.3	19.9	38.51
7	3196.8	2152.68	5305.4	4349.85	8502.2	6502.53	1.02	1.01	87.1	65.6	14165.5	10197.7	0.82	0.71	115.8	72.6	24.1	12.9	91.7	59.7	22.41
8	2673.9	2291.07	5489.6	4101.34	8163.5	6392.41	1.02	1.01	83.5	64.4	11736.5	8339.0	0.68	0.64	79.4	53.0	30.5	20.4	48.8	32.6	-9.72
9	5342.3	6910.71	6708.3	7608.85	12050.6	14519.6	1.04	1.05	125.3	151.9	18978.3	20098.4	0.70	0.82	133.4	164.2	24.8	40.8	108.6	123.4	12.78
10	2088.8	818.304	4675.1	2561.09	6764.0	3379.39	1.01	0.94	68.4	31.9	7967.3	12635.1	0.64	0.74	50.7	93.5	19.0	39.1	31.7	54.5	27.53
11	1582.6	819.048	4834.4	2522.32	6417.0	3341.37	1.01	0.94	64.6	31.5	6590.0	4125.4	1.03	0.84	67.7	34.5	11.1	11.1	56.6	23.4	3.78
12	1526.3	1738.69	2970.8	3531.92	4497.1	5270.61	0.98	0.99	44.0	52.3	7629.8	11558.0	0.80	0.75	61.3	87.2	15.0	25.9	46.3	61.2	32.72
13	2312.9	1926.04	5302.4	3827.23	7615.3	5753.27	1.02	1.00	77.5	57.5	7269.1	7762.6	0.88	0.93	63.9	72.0	12.2	14.6	51.7	57.4	0.56
14	283.8	331.027	2368.2	1650.67	2651.9	1981.7	0.91	0.85	24.1	16.9	10129.6	8091.4	0.81	0.78	81.7	63.5	48.5	33.9	33.2	29.6	65.34
15	1782.0	5157.14	4970.5	9171.43	6752.5	14328.6	1.01	1.05	68.3	149.9	15523.7	15296.2	0.71	0.76	110.3	115.5	32.0	32.2	78.3	83.4	4.83
16	7777.2	6802.68	9419.1	7693.23	17196.3	14495.9	1.05	1.05	180.7	151.7	17748.6	15401.5	1.18	1.15	210.0	177.6	32.8	73.6	177.2	103.9	34.61
17	7.6	8.92857	1227.7	1124.55	1235.3	1133.48	0.72	0.68	8.8	7.7	2098.1	1353.3	1.11	1.06	23.3	14.3	15.0	8.8	8.3	5.5	13.15
18	427.5	503.943	2791.4	3481.99	3218.8	3985.94	0.94	0.96	30.2	38.5	6758.8	5052.1	0.77	1.08	51.9	54.7	8.9	10.2	42.9	44.5	23.75
19	709.2	514.881	2417.9	2233.78	3127.0	2748.66	0.93	0.91	29.2	25.1	4028.1	5710.7	1.17	0.98	47.3	56.2	21.6	29.3	25.7	27.0	30.85
20	446.4	1897.84	1690.6	3396.35	2137.1	5294.2	0.87	0.99	18.5	52.6	10894.6	6752.7	0.70	0.74	76.0	49.8	19.4	12.9	56.6	36.9	34.29
21	544.1	44.4196	2229.0	1278.13	2773.1	1322.54	0.92	0.74	25.4	9.8	5132.4	7033.3	0.84	0.85	43.0	59.5	19.4	26.9	23.5	32.6	42.20
22	1128.6	4007.29	2760.6	7157.44	3889.2	11164.7	0.96	1.04	37.4	115.8	7055.5	14535.0	1.05	0.98	73.8	143.1	7.2	23.2	66.6	119.9	39.97
23	3676.6	2129.76	5236.2	4109.52	8912.7	6239.29	1.03	1.01	91.5	62.7	12188.9	14579.2	0.62	0.84	75.7	122.0	14.1	19.6	61.6	102.4	27.27
24	2809.7	5972.1	5145.5	7889.36	7955.3	13861.5	1.02	1.04	81.2	144.8	14797.0	14514.3	0.85	0.88	126.5	127.5	28.1	34.6	98.4	92.9	17.53
25	2514.7	845.461	4194.0	2975.22	6708.7	3820.68	1.01	0.96	67.8	36.7	7414.9	12656.8	0.97	0.85	71.9	107.6	24.6	39.8	47.3	67.8	47.03
26	1241.0	1381.77	7032.4	8664.43	8273.4	10046.2	1.02	1.03	84.6	103.7	12474.6	12785.6	1.07	1.09	133.8	139.3	24.3	53.9	109.5	85.4	53.13
27	2564.1	1339.58	5495.5	3092.19	8059.6	4431.77	1.02	0.98	82.3	43.3	8075.5	6282.7	0.95	1.12	77.0	70.5	22.6	15.9	54.4	54.5	13.69

NF : 79.73 kg N ha⁻¹

Annexe13a: Calcul des exportations N (outputs) et estimation des inputs N (atmosphérique, engrais et fixation N₂) pour le traitement te

Années	*Ntot plantes	Cumul Ntot plantes	Nfix	Np
1960	56.44	56.44	2	3
1961	6.12	62.56	4	4
1962	6.12	68.68	8	8
1963	6.12	74.80	12	12
1964	6.12	80.92	14	14
1965	11.22	92.14	16	16
1966	6.29	98.43	18	18
1967	2.04	100.47	20	20
1968	2.72	103.19	22	22
1969	4.76	107.95	24	24
1970	5.78	113.73	26	26
1971	5.10	118.83	28	28
1972	5.10	123.93	30	30
1973	7.89	131.82	32	32
1974	1.12	132.94	34	34
1975	1.84	134.78	36	36
1976	0.37	135.15	38	38
1977	2.11	137.26	40	40
1978	0.24	137.50	42	42
1979	9.35	146.85	44	44
1980	2.82	149.67	46	46
1981	12.21	161.88	48	48
1982	9.39	171.27	50	50
1983	17.61	188.88	52	52
1984	17.00	205.88	54	54
1985	11.80	217.68	56	56
1986	9.35	227.03	58	58
1987	16.52	243.55	60	60

*Sedogo (1993).

Nfix = Fixation de N₂ libre et rhizosphérique = 2 kg N ha⁻¹an⁻¹ (Ganry, 1990)

Np = apports par les pluies et les dépositions atmosphériques = 3 kg N ha⁻¹ an⁻¹ (voir chap.2)

Annexe 13b : Calcul des exportations N (output connus) et estimation des inputs N (atmosphérique, engrais et fixation N₂) pour le traitement fm

Années	*Ntot plantes	Cumul Ntot plantes	Nfix	NF
1960	41.82	41.82	5	8
1961	19.04	60.86	10	16
1962	12.92	73.78	15	24
1963	13.60	87.38	20	32
1964	11.56	98.94	25	40
1965	24.14	123.08	30	48
1966	26.45	149.53	35	56
1967	12.92	162.45	40	64
1968	15.98	178.43	45	72
1969	29.58	208.01	50	122
1970	46.92	254.93	55	172
1971	26.69	281.62	60	213
1972	33.25	314.87	65	254
1973	20.40	335.27	70	295
1974	23.05	358.32	75	336
1975	8.43	366.75	80	378
1976	4.96	371.71	85	420
1977	2.11	373.82	90	562
1978	2.75	376.57	95	499
1979	36.35	412.92	100	536
1980	18.12	431.04	105	573
1981	38.76	469.80	110	610
1982	34.88	504.68	115	647
1983	47.09	551.77	120	684
1984	55.42	607.19	125	721
1985	25.47	632.66	130	754
1986	10.03	642.69	135	795
1987	36.41	679.10	140	832

*Sedogo (1993).

Nfix = Fixation de N₂ libre et rhizosphérique = 5 kg N ha⁻¹ an⁻¹ (Ganry, 1990)

Np = apports par les pluies et les dépositions atmosphériques = 3 kg N ha⁻¹ an⁻¹ (voir chap.2)

NF = apport N engrais

Annexe 13c : Calcul des exportations N (output connus) et estimation des inputs N (atmosphérique, engrais et fixation N₂) pour le traitement fmo

Années	*Ntot plante	Cumul Ntot plante	Np	NF	N fumier
1960	54.40	54.40	3	8	41.8
1961	28.56	82.96	6	16	83.6
1962	12.58	95.54	9	24	125.4
1963	18.70	114.24	12	32	167.2
1964	18.36	132.60	15	40	209.0
1965	40.80	173.40	18	48	250.8
1966	44.20	217.60	21	56	292.6
1967	49.64	267.24	24	64	334.4
1968	32.98	300.22	27	72	376.2
1969	61.20	361.42	30	122	418.0
1970	72.76	434.18	33	172	459.8
1971	71.91	506.09	36	213	501.6
1972	48.69	554.78	39	254	543.4
1973	43.18	597.96	42	295	585.2
1974	78.00	675.96	45	336	627.0
1975	83.03	758.99	48	378	668.8
1976	31.18	790.17	51	420	710.6
1977	17.54	807.71	54	462	710.6
1978	21.32	829.03	57	499	752.4
1979	51.78	880.81	60	536	752.4
1980	47.12	927.93	63	573	794.2
1981	66.67	994.60	66	610	794.2
1982	56.17	1050.77	69	647	836.0
1983	47.43	1098.20	72	684	836.0
1984	68.71	1166.91	75	721	877.8
1985	40.77	1207.68	78	758	877.8
1986	54.47	1262.15	81	795	919.6
1987	49.84	1311.99	84	832	919.6

*Sedogo (1993).

Nfix = Fixation de N₂ libre et rhizosphérique = 5 kg N ha⁻¹ an⁻¹ (Ganry, 1990)

Np = apports par les pluies et les dépositions atmosphériques = 3 kg N ha⁻¹ an⁻¹ (voir chap.2)

NF = apport N engrais

Annexe 13d : Calcul des exportations N (output connus) et estimation des inputs N (atmosphérique, engrais et fixation N₂) pour le traitement FM

Années	*Ntot plantes	Cumul Ntot plantes	Np	NF	
				apport	cumul
1960	41.82	41.82	3	8	8
1961	19.04	60.83	6	8	16
1962	12.92	73.78	9	8	24
1963	29.58	103.36	12	50	74
1964	22.10	125.46	15	50	124
1965	57.46	182.92	18	50	174
1966	49.95	232.87	21	50	224
1967	23.12	255.99	24	50	274
1968	27.68	283.67	27	50	324
1969	30.60	314.27	30	100	424
1970	68.34	382.61	33	100	524
1971	34.51	417.12	36	96	620
1972	29.38	446.50	39	96	716
1973	20.37	466.87	42	87	803
1974	16.29	483.16	45	87	890
1975	11.73	494.89	48	65	955
1976	1.05	495.94	51	65	1020
1977	0.51	496.45	54	65	1085
1978	5.13	501.58	57	60	1145
1979	60.11	561.69	60	60	1205
1980	31.59	593.28	63	60	1265
1981	39.10	632.38	66	60	1325
1982	48.14	680.52	69	60	1385
1983	57.87	738.39	72	60	1445
1984	49.03	787.42	75	60	1506
1985	35.43	822.85	78	60	1565
1986	22.68	845.53	81	60	1625
1987	48.84	864.37	84	60	1685

*Sedogo (1993).

Chaque valeur Ntot plante est la moyenne des répétitions 1, 3, 4 et 5.

Chaque valeur par répétition est obtenue de la façon suivante :

Ntot Plantes = Ntot grains + Ntot panicules + Ntot paille

Nfix = Fixation de N₂ libre et rhizosphérique = 7 kg N ha⁻¹ an⁻¹ (Ganry, 1990)

Np = apports par les pluies et les dépositions atmosphériques = 3 kg N ha⁻¹ an⁻¹ (voir chap.2)

NF = apport N engrais

Annexe 13e : Calcul des exportations N (output connus) et estimation des inputs N (atmosphérique, engrais et fixation N₂) pour le traitement FMO

Années	*N tot plantes	Cumul Ntot plante	Np	NF apport cumul		N Fumier apport cumul	
1960	54.40	54.40	3	8	8	41.8	41.8
1961	28.56	82.96	6	8	16	41.8	83.6
1962	12.58	95.54	9	8	24	41.8	125.4
1963	51.34	146.88	12	50	74	334.4	459.8
1964	55.08	201.96	15	50	124	334.4	794.2
1965	110.50	312.46	18	50	174	334.4	1128.6
1966	67.83	380.29	21	50	224	334.4	1463.0
1967	93.84	474.13	24	50	274	334.4	1797.4
1968	85.68	559.81	27	50	324	334.4	2131.8
1969	105.40	665.21	30	100	424	334.4	2466.2
1970	87.04	752.25	33	100	524	334.4	2800.6
1971	90.61	842.86	36	96	620	334.4	3135.0
1972	61.61	904.47	39	96	716	334.4	3469.4
1973	65.28	969.75	42	87	803	334.4	3803.8
1974	131.00	1100.75	45	87	890	334.4	4138.2
1975	128.55	1229.30	48	65	955	334.4	4472.2
1976	78.03	1307.33	51	65	1020	334.4	4807.0
1977	53.89	1361.22	54	65	1085	-	4807.0
1978	80.10	1441.32	57	60	1145	334.4	5141.4
1979	78.68	1520.00	60	60	1205	-	5141.4
1980	89.79	1609.79	63	60	1265	334.4	5475.8
1981	88.26	1698.05	66	60	1325	-	5475.8
1982	91.12	1789.17	69	60	1385	334.4	5810.2
1983	124.85	1914.02	72	60	1445	-	5810.2
1984	125.05	2039.07	75	60	1505	334.4	6144.6
1985	115.29	2154.36	78	60	1565	-	6144.6
1986	112.81	2267.17	81	60	1625	334.4	6479.0
1987	135.69	2402.86	84	60	1685	-	6476.0

*Sedogo (1993).

Nfix = Fixation de N₂ libre et rhizosphérique = 7 kg N ha⁻¹ an⁻¹ (Ganry, 1990)

Np = apports par les pluies et les dépôts atmosphériques = 3 kg N ha⁻¹ an⁻¹ (voir chap.2)

NF = apport N engrais

Annexe 14 : Principe et fonctionnement d'un tensionic.

- Principe

Le tensionic est composé d'une céramique poreuse, collée au bout d'une canne d'accès à l'intérieur de laquelle passe les tuyaux de transferts de l'eau. Le tensionic est introduit dans le sol du côté de la céramique poreuse qui devra être positionné dans l'endroit du sol où l'on veut quantifier le contenu de la solution liquide disponible. Une fois installé et chargé d'eau dégazée (ou distillée), un échange ionique se produira entre la solution du sol et l'eau du tensionic à travers la céramique poreuse. Au bout d'un certain temps, il s'établira alors un équilibre ionique entre ces deux solutions, vient alors l'extraction et le dosage de la solution de tensionic qui est le reflet de celle du sol.

- Préparation et installation de la canne de tensionic

Avant son installation, la céramique du tensionic doit être imbibée d'eau dégazée (ou distillée) en le plongeant dans un récipient. Son circuit hydraulique est ensuite purgée avec l'eau dégazée à l'aide d'une seringue en maintenant ouvert le bouchon auto-cicatrisant et la molette de fermeture de la chambre ; et cela jusqu'à n'est plus observer de bulles de gaz pendant la purge. Le tensionic toujours plongé dans l'eau dégazée est ainsi prêt pour l'installation.

L'installation se fait à l'aide d'une tarière au diamètre adapté (juste pour laisser passer la canne) et, à la profondeur choisie. Cette précaution permet d'avoir le meilleur contact entre le sol et la céramique.

- Mesures

Le tensionic correctement installé est rempli d'eau dégazée, la molette de fermeture resté ouverte. Au bout de 8 à 10 jours nécessaires pour l'établissement de l'équilibre ionique entre la solution du sol et l'eau du tensionic, la solution du tensionic est prélevée à l'aide de seringue à partir des capillaires prévus à cet effet et, transférée dans des vénojects sous vide pour le laboratoire. La molette de fermeture permet la mesure de la charge hydraulique à l'aide d'un tensiomètre électronique sur les tensionics complets.

Annexe 15 : Quantité moyenne d'éléments lixiviés (kg 10⁻² ha⁻¹). Essai longue durée de Saria

Date	drainage mm	N-NO ₃ ⁻			N-NH ₄ ⁺		
		te	fmo	fm	te	fmo	fm
07/08/1999	-5.0	4.46	5.72	9.94	3.91	4.26	10.39
09/08/1999	-34.1	42.48	47.72	81.84	29.29	27.25	60.72
10/08/1999	-45.7	65.13	69.96	119.36	41.15	35.46	74.91
13/08/1999	-28.1	55.23	54.18	91.39	28.84	19.90	34.25
14/08/1999	-18.6	39.87	38.29	64.40	19.85	12.74	20.05
24/08/1999	-14.5	51.81	42.71	62.87	14.50	6.78	8.65
01/09/1999	-9.3	43.41	32.66	42.88	7.31	2.95	4.91
03/09/1999	-23.2	116.66	84.16	107.79	17.08	7.27	11.81
06/09/1999	-9.2	51.59	35.22	43.54	6.14	2.84	4.45
07/09/1999	-2.3	13.09	8.79	10.74	1.46	0.69	1.07
08/09/1999	-18.2	108.69	71.84	86.86	11.28	5.56	8.47
09/09/1999	-1.1	6.90	4.49	5.37	0.67	0.34	0.51
10/09/1999	-3.5	22.01	14.13	16.72	1.99	1.05	1.55
total	-212.6	621.31	509.85	743.72	183.45	127.09	241.73

Date	drainage mm	Ca			Mg		
		te	fmo	fm	te	fmo	fm
07/08/1999	-5.0	11.24	12.11	19.40	2.16	2.63	3.28
09/08/1999	-34.1	107.35	96.76	178.21	20.38	19.16	28.43
10/08/1999	-45.7	164.72	139.51	270.06	31.13	26.58	42.27
13/08/1999	-28.1	139.92	104.08	223.98	26.23	18.04	33.73
14/08/1999	-18.6	101.05	72.86	160.88	18.91	12.31	24.01
24/08/1999	-14.5	107.95	105.08	151.62	19.36	17.46	23.62
01/09/1999	-9.3	78.28	94.16	95.53	13.94	16.37	15.79
03/09/1999	-23.2	208.73	241.70	238.94	38.89	42.41	39.23
06/09/1999	-9.2	91.39	100.60	95.82	17.99	17.88	15.58
07/09/1999	-2.3	23.12	25.06	23.59	4.62	4.47	3.82
08/09/1999	-18.2	191.48	204.52	190.23	38.83	36.62	30.74
09/09/1999	-1.1	12.12	12.76	11.73	2.49	2.29	1.89
10/09/1999	-3.5	38.58	40.09	36.44	8.03	7.23	5.85
total	-212.6	1275.9	1249.3	1696.4	243.0	223.5	268.3

Date	drainage mm	K		
		te	fmo	fm
07/08/1999	-5.0	3.59	4.41	5.48
09/08/1999	-34.1	28.24	33.68	41.92
10/08/1999	-45.7	40.45	47.67	59.37
13/08/1999	-28.1	29.74	34.04	42.47
14/08/1999	-18.6	20.74	23.56	29.40
24/08/1999	-14.5	20.25	22.13	25.21
01/09/1999	-9.3	14.32	15.29	15.71
03/09/1999	-23.2	36.92	38.99	39.01
06/09/1999	-9.2	15.46	16.08	15.47
07/09/1999	-2.3	3.86	3.99	3.79
08/09/1999	-18.2	31.56	32.49	30.49
09/09/1999	-1.1	1.97	2.02	1.87
10/09/1999	-3.5	6.21	6.33	5.80
total	-212.6	253.30	280.68	315.99

NB.: Chaque donnée est la moyenne de 3 tensionics pour le te, de 7 pour le fm et 7 pour le fmo, placés dans 4 répétitions.

Annexe 15 suite : Quantité moyenne de N engrais lixivié. Essai longue durée de Saria

Date	drainage (mm)	QtNminLixivié (kg 10 ⁻² ha ⁻¹)			%NdffLixivié		QtNEngrLixivié (kg 10 ⁻² ha ⁻¹)	
		te	fino	fin	fino	fin	fino	fin
07/08/1999	-5.0	8.4	10.0	20.3	2.1	17.3	0.2	3.5
09/08/1999	-34.1	71.8	75.0	142.6	2.1	26.0	1.6	37.1
10/08/1999	-45.7	106.3	105.4	194.3	2.1	30.3	2.2	58.9
13/08/1999	-28.1	84.1	74.1	125.6	2.1	43.3	1.5	54.5
14/08/1999	-18.6	59.7	51.0	84.4	2.1	47.7	1.1	40.3
24/08/1999	-14.5	66.3	49.5	71.5	2.7	69.1	1.3	49.4
01/09/1999	-9.3	50.7	35.6	47.8	3.8	73.4	1.4	35.1
03/09/1999	-23.2	133.7	91.4	119.6	5.0	65.1	4.5	77.8
06/09/1999	-9.2	57.7	38.1	48.0	6.7	52.6	2.5	25.3
07/09/1999	-2.3	14.5	9.5	11.8	7.3	48.5	0.7	5.7
08/09/1999	-18.2	120.0	77.4	95.3	7.8	44.3	6.1	42.2
09/09/1999	-1.1	7.6	4.8	5.9	8.4	40.2	0.4	2.4
10/09/1999	-3.5	24.0	15.2	18.3	9.0	36.0	1.4	6.6
total	-212.6						24.8	438.8

Annexe 16 : Régression entre N volatilisé et les données du sol. Analyses faites avec le

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
Nvolat#	20.56	8.301	10
Argile	12.00	7.511	10
CEC	2.61	1.171	10
M#O#	0.620024042	0.392511139	10

Correlations

		Nvolat#	Argile	CEC	M#O#
Pearson Correlation	Nvolat#	1	-0.949	-0.805	-0.69
	Argile	-0.949	1	0.843	0.789
	CEC	-0.805	0.843	1	0.783
	M#O#	-0.69	0.789	0.783	1
Sig. (1-tailed)	Nvolat#	.	0	0.002	0.014
	Argile	0	.	0.001	0.003
	CEC	0.002	0.001	.	0.004
	M#O#	0.014	0.003	0.004	.
N	Nvolat#	10	10	10	10
	Argile	10	10	10	10
	CEC	10	10	10	10
	M#O#	10	10	10	10

Variables Entered/Removed^b

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	M#O#, , CEC Argile ^a	.	Enter

a All requested variables entered.

b Dependent Variable: Nvolat#

Model Summary^b

	Model 1
R	0.955 ^a
R Square	0.911
Adjusted R Square	0.867
Std. Error of the Estimate	3.0313
Change Statistics	R Square Change
	F Change
	df1
	df2
	Sig. F Change
Durbin-Watson	1.242

a Predictors: (Constant), M#O#, CEC, Argile

b Dependent Variable: Nvolat#

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	565.081	3	188.36	20.499	0.001 ^a
	Residual	55.131	6	9.189		
	Total	620.212	9			

a Predictors: (Constant), M#O#, CEC, Argile

b Dependent Variable: Nvolat#

logiciel SPSS en mode ENTER.

Annexe 16, suite et fin

Coefficients^a

		Model			
		1			
Unstandardized Coefficients	B	(Constant)	Argile	CEC	M#O#
	Std. Error	33.341	-1.121	-0.673	3.917
Standardized Coefficients	Beta	2.5	0.271	1.716	4.486
			-1.015	-0.095	0.185
t		13.334	-4.138	-0.392	0.873
	Sig.	0	0.006	0.709	0.416
95% Confidence Interval for B	Lower Bound	27.222	-1.784	-4.872	-7.06
	Upper Bound	39.459	-0.458	3.527	14.893
Correlations	Zero-order		-0.949	-0.805	-0.69
	Partial		-0.861	-0.158	0.336
	Part		-0.504	-0.048	0.106
Collinearity Statistics	Tolerance		0.246	0.253	0.329
	VIF		4.058	3.958	3.037

Dependent Variable:
Nvolat#

a

Coefficient Correlations^a

Model			M#O#	CEC	Argile
1	Correlations	M#O#	1	-0.357	-0.386
		CEC	-0.357	1	-0.589
		Argile	-0.386	-0.589	1
	Covariances	M#O#	20.123	-2.745	-0.469
		CEC	-2.745	2.946	-0.274
		Argile	-0.469	-0.274	7.34E-02

Dependent Variable:
Nvolat#

a

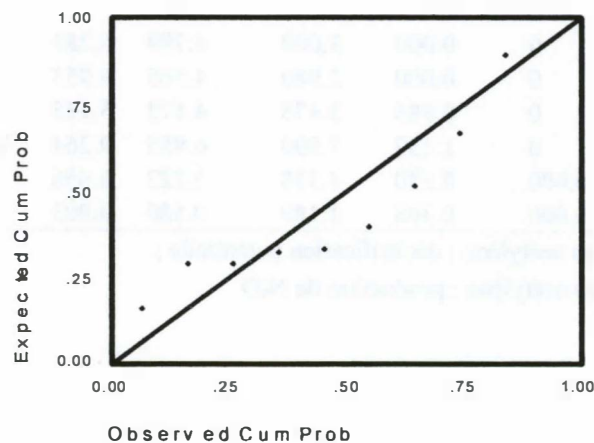
Residuals Statistics^a

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	2.8411	33.1668	20.5591	7.9238	10
Residual	-3.0249	4.5291	0	2.475	10
Std. Predicted Value	-2.236	1.591	0	1	10
Std. Residual	-0.998	1.494	0	0.816	10

Dependent Variable:
Nvolat#

a

Normal P-P Plot of Regression Standardized Residuals
Dependent Variable : Nvolat#



Annexe 17₁ : Production de N₂O et dénitrification potentielle, monoculture de sorgho,
essai longue durée de Saria (µg N-N₂O g⁻¹ sol sec)

	TO	T3=71h	T4=143h	T5=190h	T6=237h	T7=334h	Total
	0	71	143	190	237	334	
te							
rép2	0	0.000	4.643	5.811	6.686	7.159	
rép3	0	0.000	2.578	3.660	4.702	5.559	
rép4	0	0.000	1.898	6.657	2.963	3.506	
rép5	0	1.391	9.920	16.391	13.479	14.079	
moyenne	0.000	0.348	4.760	8.130	6.958	7.576	27.77
écart type moy	0.000	0.348	1.816	2.825	2.303	2.293	
fmo							
rép2	0	0.000	5.521	2.608	3.274	3.873	
rép3	0	1.710	4.333	5.151	6.267	11.108	
rép4	0	2.559	6.717	13.968	12.866	15.731	
rép5	0	1.570	5.188	6.446	7.028	8.282	
moyenne	0.000	1.460	5.440	7.043	7.359	9.749	31.05
écart type moy	0.000	0.533	0.494	2.442	2.007	2.488	
fm							
Rép2	0	0.000	6.954	4.910	5.172	7.430	
Rép3	0	0.000	3.407	4.522	5.944	10.755	
Rép4	0	1.127	3.377	4.463	5.206	5.528	
Rép5	0	1.138	5.600	11.268	9.775	16.355	
moyenne	0.000	0.566	4.835	6.291	6.524	10.017	28.23
écart type moy	0.000	0.327	0.877	1.662	1.098	2.373	
te;C₂H₂							
rép2	0	0.953	9.491	11.236	15.325	15.389	
rép3	0	1.757	7.654	12.553	14.416	15.983	
rép4	0	0.000	2.001	2.363	6.090	2.822	
rép5	0	1.742	7.549	13.758	12.558	12.852	
moyenne	0.000	1.113	6.674	9.977	12.097	11.761	41.62
écart type moy	0.000	0.416	1.620	2.590	2.084	3.056	
fmo ; C₂H₂							
rép2	0	0.000	2.940	4.668	5.688	9.737	
rép3	0	1.624	9.770	14.707	16.179	18.906	
rép4	0	2.137	9.116	6.848	7.520	8.690	
rép5	0	1.063	3.839	9.722	7.957	10.373	
moyenne	0.000	1.206	6.416	8.986	9.336	11.926	37.87
écart type moy	0.000	0.458	1.762	2.170	2.333	2.352	
fm ; C₂H₂							
rép2	0	0.000	3.009	4.799	6.283	7.893	
rép3	0	0.000	2.980	4.565	5.953	7.425	
rép4	0	0.985	3.475	4.572	5.125	8.370	
rép5	0	1.137	7.890	6.955	9.264	10.313	
moyenne	0.000	0.530	4.338	5.222	6.656	8.500	25.25
écart type moy	0.000	0.308	1.189	0.580	0.903	0.634	

Les traitements avec acétylène : dénitrification potentielle ;

Les traitements sans acétylène : production de N₂O

Annexe 17_{1 suite 1} : Production de N₂O et dénitrification potentielle, rotation
sorgho-niébé, essai longue durée de Saria (µg N-N₂O g⁻¹ sol sec)

	TO	T3=71h	T4=143h	T5=190h	T6=237h	T7=334h	
	0	71	143	190	237	334	Total
temoin							
rép2	0	1.016	3.668	4.889	6.135	9.173	
rép3	0	0.811	2.074	2.612	3.361	4.276	
rép4	0	0.000	0.000	1.097	2.005	3.384	
rép5	0	0.000	1.107	2.383	3.660	6.758	
moyenne	0.000	0.457	1.712	2.745	3.790	5.898	
écart type moy	0.000	0.267	0.777	0.788	0.861	1.304	14.602
fmo							
rép2	0	1.609	3.809	4.913	5.866	7.233	
rép3	0	2.294	4.510	6.457	8.928	14.806	
rép4	0	2.295	6.038	7.595	9.154	11.156	
rép5	0	2.080	5.248	7.430	8.088	9.626	
moyenne	0.000	2.070	4.901	6.599	8.009	10.705	
écart type moy	0.000	0.162	0.479	0.616	0.750	1.587	32.284
fm							
rép2	0	0.000	3.089	5.120	6.242	8.671	
rép3	0	1.046	3.054	4.418	5.232	6.819	
rép4	0	1.501	4.165	6.113	8.085	10.042	
rép5	0	1.100	2.997	4.483	5.588	8.132	
moyenne	0.000	0.912	3.326	5.033	6.287	8.416	
écart type moy	0.000	0.320	0.280	0.393	0.635	0.667	23.974
temoin; C₂H₂							
rép2	0	2.931	6.336	7.249	7.600	9.213	
rép3	0	2.033	5.271	6.267	7.011	8.233	
rép4	0	3.329	6.562	7.704	8.391	9.490	
rép5	0	6.997	17.957	23.763	29.771	33.321	
moyenne	0.000	3.822	9.032	11.246	13.193	15.064	
écart type moy	0.000	1.092	2.988	4.183	5.533	6.092	52.357
fmo ; C₂H₂							
rép2	0	1.341	3.369	4.476	5.301	6.645	
rép3	0	2.129	5.656	8.204	9.915	13.872	
rép4	0	2.107	5.800	7.222	7.903	9.054	
rép5	0	6.555	12.573	15.472	21.041	24.724	
moyenne	0.000	3.033	6.849	8.844	11.040	13.574	
écart type moy	0.000	1.188	1.987	2.346	3.465	4.009	43.340
fm ; C₂H₂							
rép2	0	0	1.453	2.214	3.111	5.216	
rép3	0	0	1.117	4.707	2.220	3.128	
rép4	0	0	3.108	5.419	6.663	8.854	
rép5	0	0	1.218	2.201	2.700	3.617	
moyenne	0.000	0.000	1.724	3.635	3.674	5.204	
écart type moy	0.000	0.000	0.467	0.837	1.013	1.296	14.237

Les traitements avec acétylène : dénitrification potentielle

Les traitements sans acétylène : production de N₂O

Annexe 17_{1 suite2}: Production de N₂O et dénitrification potentielle, haut, mi et bas de pente
d'une toposéquence de Saria (µg N-N₂O g⁻¹ sol sec)

	TO	T3=73h	T4=148h	T5=191h	T6=238h	T7=358h	Total
	0	73	148	191	238	358	
haut pente							
rép1	0	0	4.054	5.969	7.799	10.581	
rép2	0	0	3.685	5.409	7.505	13.234	
rép3	0	0	3.983	4.867	6.126	11.715	
moyenne	0.000	0.000	3.907	5.415	7.143	11.843	
écart type moy	0.000	0.000	0.098	0.276	0.447	0.666	28.309
mi pente							
rép1	0	1.239	9.849	13.893	17.837	22.393	
rép2	0	0.997	11.148	16.214	20.070	30.832	
rép3	0	1.120	10.152	12.020	15.001	25.739	
moyenne	0.000	1.119	10.383	14.042	17.636	26.321	
écart type moy	0.000	0.060	0.340	1.051	1.270	2.125	69.502
Bas de pente							
rép1	0	48.212	119.506	78.560	27.118	0	
rép2	0	41.198	104.851	104.944	56.158	0	
rép3	0	51.602	118.068	79.370	26.506	0	
moyenne	0.000	47.004	114.142	87.624	36.594	0.000	
écart type moy	0.000	2.653	4.039	7.502	8.473	0.000	285.365
haut pente; C₂H₂							
rép1	0	0	4.826	8.806	12.204	34.458	
rép2	0	0	6.536	9.789	13.391	34.088	
rép3	0	1.039	11.913	14.211	16.533	25.576	
moyenne	0.000	0.346	7.758	10.935	14.043	31.374	
écart type moy	0.000	0.300	1.849	1.440	1.118	2.512	64.456
mi pente ; C₂H₂							
rép1	0	0	11.953	15.351	19.242	37.679	
rép2	0	1.057	9.970	20.768	31.238	42.839	
rép3	0	0	6.072	12.335	19.229	33.828	
moyenne	0.000	0.352	9.332	16.151	23.236	38.115	
écart type moy	0.000	0.305	1.496	2.136	3.465	2.261	87.187
bas pente ; C₂H₂							
rép1	0	44.231	117.874	127.440	126.016	124.654	
rép2	0	43.303	115.166	125.981	124.254	125.519	
rép3	0	43.592	111.805	127.797	124.698	125.255	
moyenne	0.000	43.709	114.948	127.073	124.989	125.142	
écart type moy	0.000	0.237	1.520	0.481	0.458	0.222	535.861

Les traitements avec acétylène : dénitrification
potentielle ;

Les traitements sans acétylène : production de N₂O

Annexe 17_{1 suite3}: Production de N₂O et dénitrification potentielle, champ de brousse
et champ de case de Thiougou ($\mu\text{g N-N}_2\text{O g}^{-1} \text{ sol sec}$)

	TO	T3=73h	T4=148h	T5=191h	T6=238h	T7=358h	Total
	0	73	148	191	238	358	
champ de case							
rép1	0	0	0	1.070	2.422	2.074	
rép2	0	1.225	3.014	4.878	6.463	7.834	
rép3	0	0	1.861	2.743	2.370	3.927	
moyenne	0.000	0.408	1.625	2.897	3.752	4.612	
écart type moy	0.000	0.354	0.760	0.955	1.174	1.470	13.293
champ de brousse							
rép1	0	1.023	2.717	3.586	4.784	9.224	
rép2	0	1.076	3.193	4.617	7.364	18.720	
moyenne	0.000	1.050	2.955	4.102	6.074	13.972	
écart type moy	0.000	0.019	0.168	0.364	0.912	3.357	28.152
champ de case, C₂H₂							
rép1	0	8.108	25.217	34.643	46.321	67.058	
rép2	0	7.529	30.125	44.242	58.099	85.868	
rép3	0	9.221	29.677	41.095	55.885	80.885	
moyenne	0.000	8.286	28.340	39.993	53.435	77.937	
écart type moy	0.000	0.430	1.357	2.447	3.130	4.873	207.991
champ de brousse ; C₂H₂							
rép1	0	1.319	6.021	10.763	21.736	42.661	
rép2	0	0	3.245	6.251	11.816	15.755	
moyenne	0.000	0.659	4.633	8.507	16.776	29.208	
écart type moy	0.000	0.466	0.981	1.596	3.507	9.513	59.784

Les traitements avec acétylène : dénitrification
potentielle ;

Les traitements sans acétylène : production de N₂O

Annexe 17₂ : Production de CO₂ (µgC-CO₂ g⁻¹ sol sec)

traitement	Durée incubation (heure)					
	0	71	143	190	237	334
te-a						
moyenne	0.000	5.870	10.526	15.349	17.585	18.232
écart type	0.000	2.042	3.247	4.328	4.138	3.167
te-a ; C₂H₂						
moyenne	0.000	6.026	10.596	15.412	17.829	18.706
écart type	0.000	1.691	3.178	4.622	4.891	4.819
fmo-a						
moyenne	0.000	7.839	13.663	19.437	21.938	23.112
écart type	0.000	2.228	3.853	5.377	6.601	8.320
fmo-a ; C₂H₂						
moyenne	0.000	8.111	13.177	18.524	20.609	21.817
écart type	0.000	2.347	4.133	5.036	5.220	5.493
fm-a						
moyenne	0.000	5.982	11.726	15.434	17.054	16.500
écart type	0.000	3.135	2.570	3.779	3.959	3.388
fm-a ; C₂H₂						
te-c						
moyenne	0.000	17.749	22.450	26.311	28.841	33.439
écart type	0.000	1.794	2.579	3.444	3.314	3.401
te-c ; C₂H₂						
moyenne	0.000	15.483	20.209	23.073	24.567	27.569
écart type	0.000	3.511	5.419	5.570	5.934	7.150
fmo-c						
moyenne	0.000	17.945	23.096	27.008	29.325	32.472
écart type	0.000	1.731	2.428	2.887	3.273	3.016
fmo-c ; C₂H₂						
moyenne	0.000	17.722	23.526	27.660	29.620	33.804
écart type	0.000	1.567	2.226	2.597	2.510	3.292
fm-c						
moyenne	0.000	12.941	16.620	19.260	20.172	22.285
écart type	0.000	1.153	1.268	1.479	1.730	1.953
fm-c ; C₂H₂						
moyenne	0.000	12.887	16.417	19.064	20.227	22.571
écart type	0.000	3.425	4.236	4.943	5.161	5.455

a : sorgho continu

c : rotation sorgho-niébé

Chaque donnée est la moyenne de 4 répétitions

Annexe 17₂ , suite et fin : Production de CO₂ (µg C-CO₂ g⁻¹ sol sec)

traitement	Durée incubation (heure)					
	0	71	143	190	237	334
haut pente						
moyenne	0.000	14.341	24.098	26.992	30.897	40.914
écart type	0.000	2.980	3.108	2.345	3.984	5.116
haut pente ; C₂H₂						
moyenne	0.000	14.791	27.606	30.867	33.886	40.624
écart type	0.000	8.626	12.228	10.105	8.666	10.176
mi pente						
moyenne	0.000	10.839	24.387	27.549	31.112	39.907
écart type	0.000	1.885	1.787	1.628	3.076	3.046
mi pente ; C₂H₂						
moyenne	0.000	12.456	23.020	27.905	35.671	42.939
écart type	0.000	1.769	4.344	3.923	5.348	5.395
Bas pente						
moyenne	0.000	61.732	73.324	73.616	79.601	83.369
écart type	0.000	4.572	1.627	1.596	1.265	1.235
bas pente ; C₂H₂						
moyenne	0.000	61.494	72.301	72.829	75.619	80.697
écart type	0.000	1.871	0.512	1.152	2.068	0.571
Champ de case						
moyenne	0.000	21.419	31.544	33.291	36.496	41.568
écart type	0.000	2.321	0.113	0.973	1.284	1.893
champ de case ; C₂H₂						
moyenne	0.000	21.585	32.521	34.107	36.670	42.295
écart type	0.000	1.495	1.394	1.643	1.796	2.095
champ de brousse						
moyenne	0.000	16.902	21.947	26.259	30.664	41.597
écart type	0.000	1.101	0.793	0.367	0.314	0.435
champ de brousse ; C₂H₂						
moyenne	0.000	24.913	35.947	40.443	43.854	49.990
écart type	0.000	12.760	19.531	19.492	18.694	17.486

Chaque donnée est la moyenne de 4 répétitions

RESUME

En zone aride et semi-aride, l'azote est un facteur limitant majeur de la production végétale mais, paradoxalement, il peut être en excès dans le sol durant certaines périodes du cycle pluviométrique, accroissant ainsi le risque pour l'environnement. On fait l'hypothèse que la maîtrise du bilan de l'azote permet de dégager des solutions économiquement acceptables pour réduire les émissions de N_2O et augmenter l'efficacité de l'engrais azoté. Ce travail a pour objectif (1) de quantifier les pertes globales de N en dehors du système sol-plante, en distinguant celles de N engrais, et d'analyser les processus majeurs à l'origine de celles-ci : minéralisation, lixiviation, volatilisation et dénitrification, (2) de définir des indicateurs de fourniture de N par le sol et par l'engrais à la plante.

Les expériences sont réalisées en station, en milieu paysan et en laboratoire. Le traceur ^{15}N permet *in situ* une approche rationnelle de l'étude de l'efficacité de l'engrais et de la fixation de N_2 .

On montre l'existence de périodes, dans le cycle pluviométrique, caractérisées soit par un déficit de $N-NO_3^-$ (Nitrif nette < 0) attribué à la dénitrification, soit par un excès de $N-NO_3^-$ par rapport à la demande de la céréale. Les pertes globales de N évaluées sur une dizaine d'années apparaissent liées positivement à deux facteurs : l'acidification du sol ($20 \text{ kg ha}^{-1}\text{an}^{-1}$ dans un sol qui s'acidifie contre 8 dans un sol où l'apport régulier de fumier empêche l'acidification), et l'intensification, notamment le chaulage en présence de fumier (68 kg N ha^{-1}) et les fortes fumures. Les processus à l'origine de ces pertes globales sont la lixiviation, la dénitrification et la volatilisation mais celle-ci affecte principalement l'azote de l'urée. La lixiviation sous sorgho à Saria (isohyète 850 mm), à 90 cm de profondeur, ne dépasse pas $10 \text{ kg N ha}^{-1}\text{an}^{-1}$. La dénitrification n'a pas été quantifiée *in situ* ; on montre cependant *in vitro* que le risque de dénitrification existe et qu'il est accru dans le sol recevant du fumier et ce en relation positive avec la teneur en argile du sol. Les pertes de N engrais (urée) sans et avec fumier sont de 31 % et 37 % dont respectivement 7 et 0.4 % proviennent de la lixiviation et, par déduction, 24 et 37 % d'émissions gazeuses. La volatilisation, mesurée au laboratoire, peut atteindre 30 % de l'urée apporté. La part de l'azote de la plante provenant du sol est élevée ($60 < NdfS\% < 80$) et liée positivement à l'efficacité de N engrais. Accroître l'efficacité de N engrais nécessite donc d'augmenter le pool N minéralisable du sol (en augmentant notamment la fixation de N_2 du niébé qui d'après nos résultats est faible) et de réduire les pertes (en enfouissant l'urée notamment). Par voie statistique, on obtient un indicateur de $NdfS\%$ fondé sur le N_{tot} plante du témoin 0N lequel est lui-même fonction de la teneur N minéral et K éch. du sol avant culture.

Abstract :

In the semi-arid and arid zones of Africa, nitrogen is a major limiting factor for crop production but, paradoxically, N can be in excess in the soil during some periods of the rainy season.

The objective of this study is to have a better knowledge of N losses under maize and sorghum in order to reduce the N_2O emission and to improve the efficiency of mineral N fertiliser in these regions. For that, we (i) quantified globally the N losses and distinguished those coming from N mineral fertiliser from N losses coming from other N sources, and, (ii) quantified the sources of N losses. In a second step, the obtained data were used to identify indicators, easily measurable, permitting to know the part of total N in the above ground plant components that is taken up from the soil (NdfS %). Our study was conducted in a research station and by on-farm research in Burkina Faso, and also in laboratories on a Luvisol. ^{15}N was used to determine N fertiliser efficiency.

The results show some periods during the raining cycle with (i) a negative nitrification that we attribute to denitrification and, (ii) others events with an excess of NO_3^- -N in the soil as compared to the N demand of the cereals. Total N losses measured during ten years, appear to be linked positively with (i) the decrease of soil pH (20 kg $\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ of N loss in soils that lost pH, but only 8 kg $\text{N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ in soils receiving manure and showed no change in pH), and, (ii) with the amount of mineral or organic amendements applied to the soil: a) liming when the soil receives also manure (loss of 68 kg $\text{N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ with manure + lime, but only 8 kg $\text{N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ with manure alone); b) increase of N fertiliser amount (loss of 63 vs. 20 kg $\text{N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ for high and low level of urea application respectively); c) increase in manure application (225 vs. 8 kg $\text{N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ with high and lower level respectively). Processes behind these N losses are leaching and denitrification; volatilisation concerns mainly N from the urea. Leaching under sorghum on the research station (mean annual rainfall 850 mm), does not exceed 10 kg $\text{N ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ at the depth of 90 cm. Denitrification data, obtained in vitro, tend to show that (i) this risk exist in the field, (ii) is increased by manure application, and (iii) that this risk is positively related by the clay content of the soil. N losses from urea applied without and with manure are 31 % and 37 % respectively from which 7 and 0.4 % respectively is leached and 24 and 37 % goes to the atmosphere. Volatilisation, measured in laboratory, can reach 30 % of the applied urea. NdfS % is high (between 60 and 80 %) and is linked positively to the efficiency of the N fertiliser. Increase of N fertiliser efficiency needs therefore a reduction of the N losses (by working the urea in the soil for example) and an increase of the pool of N in the soil that can be mineralised (for example, by increasing the symbiotic N_2 fixation capacity of the cowpea). Statistical analysis shows also that, in the absence of mineral N fertiliser, the total N amount in the above ground plant components ($\text{N}_{\text{tot plant}}$) is a useful indicator for NdfS %, and that $\text{N}_{\text{tot plant}}$ is a function of the levels in mineral N and exchangeable K in the soil before planting.