Numéro d'ordre : 33

THESE

Présentée à la FACULTÉ DES SCIENCES

de L'UNIVERSITÉ D'ABIDJAN

Pour obtenir le titre de DOCTEUR-INGENIEUR

par P. F. CHABALIER

Ingénieur E N S A

CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DU DEVENIR DE L'AZOTE DU SOL ET DE L'AZOTE-ENGRAIS DANS UN SYSTEME SOL - PLANTE

Résultats d'essais portant principalement sur les cultures de Riz et de Maïs en sols ferrallitique de BOUAKE et GAGNOA (Côte d'Ivoire)

Soutenue le 25 Novembre 1976
à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique d'Abidjan
devant la commission d'examen :

MM. TOURE BAKARY - Président
DIDIER de SAINT-AMAND R. - Examinateur (Rapporteur)
LAMBERT C. - Examinateur
LEVEQUE A. - Examinateur

Numéro d'ordre 33

THESE

Présentée à la FACULTE DES SCIENCES

de

L'UNIVERSITE D'ABIDJAN

Pour obtenir le titre de DOCTEUR-INGENIEUR

par

P.F. CHABALIER
Ingénieur ENSA

CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE DU DEVENIR DE L'AZOTE DU SOL ET DE L'AZOTE-ENGRAIS DANS UN SYSTEME SOL-PLANTE

Résultats d'essais portant principalement sur les cultures
de Riz et de Maïs en sols ferrallitiques
de BOUAKE et GAGNOA
(Côte d'Ivoire)

Soutenue le 25 Novembre 1976 *
à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique d'Abidjan
devant la commission d'examen :

MM.	TOURE BAKARY	-	Président
	DIDIER de SAINT-AMAND R.	-	Examinateur (Rapporteur)
	LAMBERT C.		Examinateur
	LEVEQUE A.	-	Examinateur

FACULTE DES SCIENCES D'ABIDJAN

LISTE DES ENSEIGNANTS

-=-=-=-=-=-=-=-

DOYEN

M.	TOURE BAKARY	Génétique

PROFESSEURS TITULAIRES

MM.	ADOU Jean-Jonas	Physique Générale
	BAKTAVATSALOU	Mathématiques
	BAUDET Jean-Guillaume	Physique Générale
	BOGUI Vincent	Physique Atmosphérique
	DIDIER de SAINT-AMAND R.	Sciences Agronomiques
Mme	EHOLIE Rose	Chimie Minérale
MM.	KAMMACHER Paul	Génétique
	LOROUGNON GUEDE Jean	Botanique
	TOURE Saliou	Mathématiques
	TRICOCHE Robert	Physiologie Animale

PROFESSEURS SANS CHAIRE

MM.	CHEZEAU Jean-Michel	Physique Générale
	FEDIERE Jean-Louis	Chimie B. C.
	LAPASSET Jacques	Physique Générale
	LEVIEUX Jean	Zoologie

MAITRES DE CONFERENCES

Mme	ANOMA Gladys	Botanique
MM.	ASSEMIEN Ahourou Paul	Botanique
	ATTIAS Joseph James	Biochimie
	BOKRA Yobou Alexandre	Chimie-Physique
	CASANOVA Roger	Géologie

.../...

MM.	CHARBONNEAU Royal	Physique Atmosphérique
	COMEAU Jean-Claude	Chimie Organique Biologique I
	DJAKOURE Atoutou Léon	Chimie Organique Biologique II
	FABRE Jean	Physique Générale
	LAMBERT Claude	Physiologie Végétale
	N'DIAYE Alassane Salif	Biologie Générale
	PROUTIERE Alain	Physique Générale
Mme	TAHIRI ZAGRET Claudine	Biologie Générale
M.	TOURE Vakaba	Chimie Organique Structurale

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

MM.	KREHER Paul	Physiologie Animale
	N'GUESSAN YAO Thomas	Chimie Organique Structurale

AVANT PROPOS

Avant d'exposer les résultats de mes recherches, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont facilité et permis la réalisation de ce travail. Les travaux qui ont servi de base à ce mémoire ont été réalisés dans le cadre des recherches menées par l'IRAT* en Côte d'Ivoire, sous la Tutelle du Ministère de la Recherche Scientifique de Côte d'Ivoire.

J'exprime d'abord ma profonde reconnaissance à mes professeurs de pédologie, Mr. SERVAT (ENSAM) et Mr. AUBERT (ORSTOM*) qui sont à la base de ma formation de pédologue.

Ma très grande reconnaissance va également à M. CHAMINADE, Professeur à l'INA* et conseiller scientifique à l'IRAT* dont la doctrine sur la fertilité des sols tropicaux est à l'origine de ce travail. Je le remercie également de m'avoir guidé par ses conseils et d'avoir bien voulu juger et corriger ce mémoire.

Je tiens à remercier Mr. P. ROCHE, Directeur du GERDAT-Montpellier*, mes collègues de l'IRAT, notamment Mr. PICHOT et Mr. EGOUMENIDES ainsi que Mr. G. GUIRAUD du CEA*-CADARACHE qui m'ont apporté l'appui indispensable dans le choix des méthodes et la réalisation de nombreuses analyses, notamment d'analyses isotopiques.

L'emploi de marqueur isotopique n'a pu être réalisé que par l'aide et le financement d'organismes tels que le DGRST* et l'AIEA* dont je tiens à remercier les responsables, notamment le Dr. BARRADA (AIEA). Je n'oublierai pas l'aide que m'a apporté Mr. le Professeur LAUDELOUT et la collaboration de son assistant Mr. L. GERMAIN de l'Université de Louvain pour certaines recherches sur l'azote.

.../...

J'exprime ma reconnaissance à Mr. R. DIDIER de SAINT-AMAND, Professeur à la Faculté des Sciences et Directeur de l'ENSA* d'Abidjan qui a guidé depuis plusieurs années ce travail et qui m'a été particulièrement précieux dans la critique et la rédaction de ce mémoire ainsi qu'à Mr. le Professeur TOURE BAKARY, Doyen de la Faculté des Sciences, à Mr. le Professeur LAMBERT et à Mr. le Docteur LEVEQUE (ORSTOM) qui ont bien voulu corriger et juger ce mémoire.

Je n'oublierai pas de remercier également mes Directeurs et Chefs de Division, Mr. ROCHE, Mr. DUMONT, Mr. TOURTE, Mr. Le BUANEC, qui m'ont facilité la tâche ainsi que tous ceux qui m'ont apporté une aide.

J'associe à ce travail le personnel du laboratoire de l'IRAT et mes assistants ivoiriens ainsi que Mr. ESQUIVIE qui ont permis la mise en place et l'entretien du réseau d'expérimentation.

AIEA = Agence Internationale de l'Energie Atomique (FAO-AIEA).

CEA = Commissariat à l'Energie Atomique.

DGRST = Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique (France).

ENSA = Ecole Nationale Supérieure Agronomique.

GERDAT Montpellier = Groupement d'Etudes et de Recherches pour le Développement de l'Agronomie Tropicale laboratoire de Montpellier.

INA = Institut National Agronomique.

IRAT = Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières.

ORSTOM = Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer.

S O M M A I R E

Pages

INTRODUCTION 1-2

I- PRESENTATION DE L'ETUDE 3

1.1. Vue d'ensemble sur la dynamique de l'azote dans le sol 3

1.2. Principe de la modelisation du système 4

1.2.1. Principes généraux

1.2.2. Les modelisations du cycle de l'azote 5

1.3. Etude proposée du système 5

1.3.1. Présentation du schéma

1.3.2. Etude du système 6

1.3.3. Degré d'étude des phénomènes d'entrées - de sortie du système et de transfert entre compartiments.

1.3.4. Rappels des principales transformations du cycle de l'azote... 8

1.3.4.1. Minéralisation

1.3.4.2. Réorganisation

1.3.4.3. Dénitrification.

II-CONDITIONS EXPERIMENTALES 12

2.1. Etudes en milieu naturel

2.1.1. Dispositifs de l'expérimentation

A - Essai "Azote-Paille" de Bouaké

B - Essais de Gagnoa

a- essai Azote-paille

b- essai Azote-compost

c- essai Paille-compost

d- emploi de N-15 sur ces essais

2.1.2. Réalisation des études et utilisation de N-15

2.1.3. Description du milieu

Localisation

Végétation

Climat

Sol

Modelé et mise en valeur

2.1.4. Conditions de réalisation des essais 1973-74 P. 26

2.2. Etudes en milieu contrôlé P. 27

a- cas de sols cultivés

b- sols non cultivés.

III- RESULTATS

Pages

3.1. Minéralisation et réorganisation 29

3.1.1. Intensité de la minéralisation dynamique de l'azote dans un sol cultivé de Bouaké. P. 30

3.1.2. Cinétique de la minéralisation 39

A - Nitrification de l'azote du sol

a- comparaison des minéralisations dans 2 types de sol Bouaké et Gagnoa.

b- influence des traitements agronomiques subis au champ sur la minéralisation de l'azote du sol.

c- effet du pH sur la minéralisation

B - Nitrification et devenir des engrais azotés P. 47

a- apport de trois formes d'azote engrais au sol de Bouaké

b- apport de N-NH4 dans un sol de Gagnoa

c- effet du pH sur la minéralisation avec apport d'azote engrais.

d- conclusion devenir d'engrais marqué dans un sol de Bouaké

3.1.3. Quantité et formes mobiles de l'azote 54

A - Formes mobiles de l'azote organique 54

B - Effets des traitements antérieurs sur les formes d'azote utilisables par la plante. 56

a- Bouaké

b- Gagnoa

C - Capacité de minéralisation et réorganisation 62

3.1.4. Conclusion sur la minéralisation et la réorganisation 65

3.2. Dénitrification chimique 67

3.2.1. Etude de la cinétique de décomposition chimique du nitrite

3.2.2. Estimation des pertes par dénitrification par l'application d'un modèle de nitrification dans les sols..... 70

3.2.2.1. Présentation du modèle

3.2.2.2. Application du modèle à un exemple du sol de Bouaké 75

3.2.2.3. Conclusions 77

3.3. Pertes par lixiviation 78

3.3.1. Matériel et méthodes

3.3.2. Résultats 80

A - Bouaké

B - Gagnoa

C - Conclusion sur la lixiviation 84

pp.

3.4. Mobilisation de l'azote par la culture et répartition dans la plante 86

3.4.1. Généralités sur les mobilisations d'azote par une culture..... 86

3.4.2. Matériel et Méthodes 87

3.4.3. Résultats 89

A - Essai Azote-paille - Bouaké 89

a- cas du riz pluvial

b- cas du maïs

c- arrière-effet de la fumure azotée

B - Essais de Gagnoa 98

a- essai Paille-compost

b- essai Azote-paille

c- essai Azote-compost

d- conclusion sur la culture du maïs à Gagnoa

3.4.4. Conclusions sur la mobilisation de l'azote par la culture..... 105

3.4.5. Conclusions sur le transfert d'azote dans le système sol-plante 106

3.5. Essai de Bilan 108

3.5.1. Estimation des facteurs non étudiés..... 108

A - Entrées dans le système

1) Apports par les précipitations atmosphériques

2) Apport par fixation atmosphérique

B - Sorties du système

1) Dénitrification biologique

2) Pertes par volatilisation

3.5.2. Bilan de l'azote 112

A - Azote dans le système sol-plante 112

- Azote organique
- Azote minéral
- Azote dans la plante

B - Entrées dans le système sol-plante 114

- Les engrais
- Fixation atmosphérique
- Restitution
- Apports par les pluies

C - Sorties du système sol-plante 116

- Lixiviation
- Dénitrification
- Volatilisation
- Exportations.

D - Réalisation d'un bilan moyen 117

pp.

3.5.3. Bilan de l'azote-engrais 118

A - Cuves lysimétriques de Bouaké

B - Cuves lysimétriques de Gagnoa

C - Bilan de l'essai azote-paille Bouaké 1973

D - Bilan - Bouaké 1974

E - Bilan des essais de Gagnoa

F - Conclusions sur le bilan de l'azote-engrais 124

IV - CONCLUSION GENERALE 125

ANNEXE : Description de sol

Tableaux de résultats.

INTRODUCTION

Le développement de l'industrie des engrais azotés a été le principal facteur de l'augmentation de la production agricole dans les pays ayant une agriculture moderne. L'intensification des cultures en Côte d'Ivoire impose le recours à la fertilisation minérale et notamment azotée. L'azote représente maintenant l'élément le plus coûteux et le plus délicat à employer de façon rationnelle et économique. Jusqu'à ce que des nouvelles sources d'azote soient susceptibles d'être employées, par exemple fixation symbiotique ou non, mais efficace de l'azote atmosphérique par les cultures, l'engrais azoté doit être appliqué au sol pour maintenir des rendements élevés permettant une culture intensifiée et continue. Le problème de l'efficacité de l'engrais azoté est particulièrement important dans les pays tropicaux où les engrais sont chers, les coûts de transport élevés et où les données sur l'utilisation des engrais et leur devenir sont peu nombreuses.

Aussi, un effort tout particulier doit être porté sur la recherche des facteurs qui régissent la dynamique de l'azote dans le système sol-plante cultivée pour pouvoir adapter au mieux la fumure azotée aux cultures et aux systèmes de cultures (choix des doses, des dates d'épandages, du travail du sol, de la fertilisation globale).

Le présent travail s'insère dans la démarche générale d'études menées par l'IRAT sur la fertilité des sols tropicaux et notamment sur le rôle de la matière organique dans la fertilité des sols.

L'expérimentation est basée sur des essais au champ perennes où l'on compare l'effet de doses croissantes d'azote, en présence ou non d'apport de matière organique, sur les rendements agricoles, la nutrition du végétal et l'évolution du sol. Ces dispositifs statistiques sont complémentés par des cuves lysimétriques qui permettent de suivre les pertes d'éléments minéraux par lixiviation dans chacun des cas.

Les deux sites étudiés sont ceux de Bouaké et de Gagnoa. Le premier appartient au domaine de la savane et le second à celui de la forêt.

L'étude consiste en la présentation et l'interprétation des résultats d'expérimentations concernant la dynamique de l'azote dans des systèmes sol-plante. Ces expérimentations ont été réalisées avec de l'azote marqué, ce qui a permis de dresser un bilan relativement précis de l'azote - engrais.

Une partie des résultats concerne des expérimentations en vraie grandeur, au champ en conditions naturelles et une autre partie relève d'expérimentations plus contrôlées destinées à comparer les deux sols entre eux, les divers effets des traitements agronomiques et l'effet de certains paramètres sur le devenir de l'azote-engrais.

Il s'agit alors d'essais de culture en vases ou de tests de minéralisation de sol pendant des périodes courtes.

La présentation de cette étude est orientée vers la mise en évidence des principaux transferts d'azote et de l'existence de certaines relations entre les variables du système formé par le sol et la plante. Une approche de bilan de l'azote dans le système est réalisée.

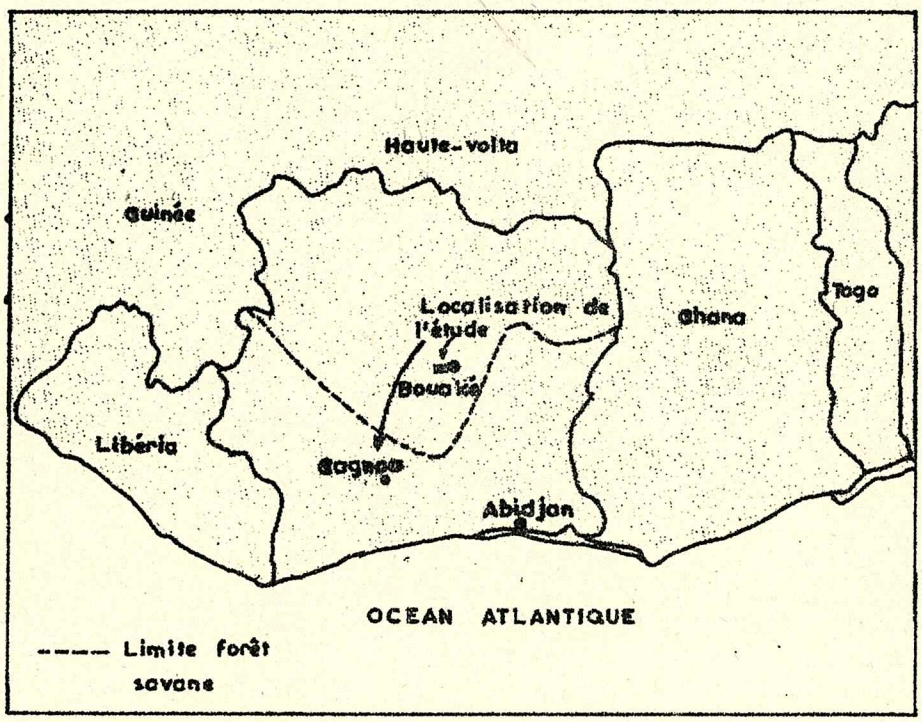
Un certain nombre de résultats et d'hypothèses permettent de donner des précisions sur l'entretien de la fertilité des sols étudiés.

Même sans atteindre le niveau d'une quantification une telle analyse a le mérite de conduire à des résultats pratiques immédiats et d'être un préalable utile à d'autres développements.

Dans une phase ultérieure de perfectionnement de l'étude, des réponses précises devraient pouvoir être données aux questions sur la fertilisation azotée, et ceci non seulement pour les cultures annuelles, mais aussi pour chaque culture particulière grâce à l'introduction de paramètres spécifiques au système à étudier.

Fig. 1

Plan de localisation



CHAPITRE I

PRESENTATION DE L'ETUDE

1 - VUE D'ENSEMBLE SUR LA DYNAMIQUE DE L'AZOTE DANS LE SOL.

L'azote présent dans le sol est essentiellement sous une forme organique inassimilable par les plantes. Le métabolisme des végétaux exige ~~essentiellement~~ des formes minérales et des formes organiques ayant des molécules de petite dimension. On conçoit que l'étude du cycle évolutif ou dynamique de l'azote revête une importance certaine pour les problèmes de nutrition azotée.

L'azote assimilable provient de la minéralisation de la matière organique. L'azote qui est présent dans des formes polymérisées, comme dans les acides fulviques, subit des transformations microbiennes, la phase finale étant la formation des nitrates.

L'azote sous forme minérale à un devenir multiple.

- une partie est utilisée par les végétaux supérieurs et est donc exportée par les récoltes.
- une autre fraction est perdue par volatilisation, par dénitrification et par lixiviation.
- le reste est réorganisé au sein de la matière organique.

Les pertes sont plus ou moins compensées par les apports : fixation biologique de l'azote, apports météoriques par l'eau de pluie, apports par les résidus végétaux.

La complexité de cette dynamique est due au fait des actions microbiennes variées et interactives. Les éléments qui agissent sur cette dynamique et qui peuvent ~~la favoriser~~ ou la ralentir sont nombreux et complexes.

l'accélérer

L'analyse de ce cycle biologique peut être fait par une analyse d'un modèle structuré en un système à compartiments qui comporterait les phases d'étude suivantes :

- isolement relatif du système par rapport au milieu extérieur
- structuration du système en divers compartiments (le nombre de compartiments choisis dépend de l'état des connaissances actuelles).
- étude des relations entre compartiments et notamment des divers flux et transfert de substances.

1.1. Principe de la modélisation du système.

1.1.1. Principes généraux.

La modélisation commence par une analyse du système qui doit rendre compte des principaux processus. On définit les limites et les objectifs et on dresse l'inventaire des phénomènes mis en jeu ainsi que les liaisons qui existent entre ces phénomènes.

La première étape est donc la construction de l'organigramme du modèle conceptuel de l'écosystème étudié.

Cette analyse oblige déjà à faire la synthèse des connaissances acquises.

Le système représenté peut donc évoluer selon un processus modulaire : un compartiment que l'on considère initialement comme une "boîte noire" peut être différencié en autant de compartiments distincts que les informations disponibles le permettent.

Il faut ensuite traduire le fonctionnement du système par des méthodes simples de bilan, c'est-à-dire trouver des relations simples qui régissent les transferts d'un compartiment à un autre. Généralement des études nouvelles sont alors nécessaires pour traduire numériquement les liaisons entre les fonctions.

C'est sur l'expression de ces liaisons que porteront le contrôle et les améliorations réalisées par la suite.

Lorsque l'on a quantifié l'organigramme, on a alors la modélisation du fonctionnement du système qui peut être alors simulé en introduisant des valeurs numériques caractérisant les paramètres des fonctions exprimant les effets étudiés.

1.1.2. Les modélisations du cycle de l'azote.

Certains modèles ont été donnés par divers auteurs depuis quelques années. Ces modèles sont tous relativement complexes et n'ont pas acquis une forme définitive.

Nous citerons le modèle de Morel (1968) le modèle de Dutt (1962-1963) et le modèle de Beck et Frissel (1973).

Ces modèles sont en général divisés en plusieurs sous programmes comme par exemple :

- programme eau
- programme échange des ions (sol - solution)
- programme transformation de l'azote
- programme déplacement des éléments solubles
- programme consommation des nitrates par les plantes.

Ils sont appliqués à des tranches successives de sol. Dans ces modèles, les relations paramétriques explicitant les transformations de l'azote sont simplifiées et utilisent des hypothèses non valables en conditions tropicales de pH, de température, de composition chimique des sols etc...

Ces modèles font appel à la présentation du programme ordinateur en langage CSMP/360. Le "Continnous system modeling program" est un langage similaire au fortran, de haut niveau : ce type de programme vise à optimiser l'interaction homme-machine plutôt qu'à obtenir la performance maximale de la machine. Le CSMP contient un certain nombre de programmes de calcul de routine suffisamment appropriés pour la simulation technique. Ils facilitent le traitement des fonctions non linéaires et appliquent des méthodes d'intégration numérique.

1.2. Etude proposée du système.

1.2.1. Présentation du schéma (fig. 2)

Pour cette première approche nous avons choisi un modèle très simplifié du cycle de l'azote dans le système sol-plante.

Le nombre de compartiments est choisi par la finesse de l'analyse du système et le degré de simplification en vue d'une interprétation, plutôt que par pure nécessité conceptuelle.

Le schéma de base représente 2 compartiments principaux qui sont eux même subdivisés de la manière suivante :

Sol - Azote minéral

- Azote de la matière organique du sol.

Plante - Azote immobilisé par les racines - la paille - les grains.

Les liaisons entre ces compartiments représenteront les phénomènes suivant :

- absorption directe
- immobilisation directe
- pertes
- absorption indirecte
- exportation et restitutions.

Sur le plan expérimental, il est donc logique d'essayer d'étudier ces différents flux. Seule la technique de marquage isotopique rend possible une telle étude : l'utilisation la plus simple étant de marquer l'engrais que l'on apporte.

Ce schéma peut être décomposé en différents compartiments : (Figure n° 2)

Azote minéral = 4 compartiments distincts :

N-engrais - N.NH4 - N.NO2 - N.NO3

Matière organique = 3 compartiments distincts :

Biomasse microbienne - Matière organique labile - Matière organique stable.

Plante = 3 compartiments :

Système racinaire - paille - grain.

1.2.2. Etude du système.

Dans cette première approche, les phénomènes qui sont apparus importants au cours de l'étude ont été contrôlés et détaillés.

L'étude que nous avons réalisée a porté essentiellement sur les points suivants :

Entrée dans le système.

- apport d'engrais
- apports organiques de résidus végétaux.

Sorties du système.

- exportations par les récoltes
- lixiviation
- dénitrification (estimation des pertes)

Transferts entre les compartiments.

- minéralisation et réorganisation
- vitesse d'absorption de l'azote et mobilisations par le végétal
- restitution des résidus
- répartition de l'azote dans la plante
- répartition de l'azote dans la matière organique du sol.

Un certain nombre de termes du bilan du système n'ont pas ou peu été étudiés. Parmi ces facteurs manquants citons :

- les apports par les eaux de pluie
- la fixation biologique de l'azote atmosphérique
- les pertes par dénitrification (mesures expérimentales directes).

Certains transferts ont été également peu étudiés.

1.2.3. Degré d'étude des phénomènes d'entrées, de sortie du système et de transfert entre les compartiments.

Il est certain qu'il sera plus facile de contrôler parfaitement certains facteurs et de mesurer directement certains transferts que d'autres plus complexes ou demandant des expérimentations très fines.

Ainsi dans les expérimentations suivies, il est facile de suivre l'évolution de l'engrais marqué, au cours de ses transformations et de ses migrations dans le sol et la plante.

De même, on connait de façon suffisamment précise l'apport d'azote que représente une restitution de matière organique au sol, que ce soit sous forme de paille ou de compost.

Par contre, il est difficile d'estimer les fixations biologiques de l'azote atmosphérique.

Les méthodes de mesure adaptées n'ont pu être employées dans nos expérimentations. De ce fait les quantités d'azote fixées échappent complètement à nos investigations. Les seules données seront des données bibliographiques d'expériences faites en Côte d'Ivoire ou dans d'autres pays sur les cultures considérées.

Il en est de même pour les sorties du système. S'il est facile de mesurer ce qu'exporte une récolte, il est beaucoup plus difficile de mesurer les pertes par volatilisation et dénitrification. Plusieurs approches ont été faites pour estimer les pertes. D'une part des expérimentations relativement simples en milieu réel ou en milieu contrôlé, par captage direct de gaz, ou par étude des déficits de bilan d'engrais marqué, et d'autre part par la mise au point dans le cas de la dénitrification chimique d'un modèle mathématique suffisamment précis représentant la nitrification et faisant intervenir les paramètres favorisant la dénitrification.

Les pertes par lixiviation ont été mesurées dans des expérimentations au champ utilisant des lysimètres de sol non perturbé de dimension moyenne. Bien que critiquable la méthode lysimétrique classique permet d'obtenir des ordres de grandeur des pertes et dans le cas d'utilisation d'engrais marqué, elle permet d'estimer assez précisement les pertes d'azote-engrais dans les conditions de l'expérimentation.

Enfin les phénomènes de minéralisation et de réorganisation ont été suivis sur des périodes courtes en milieu contrôlé et sur des périodes longues sous culture. La finesse de l'analyse n'est donc pas la même dans les deux cas.

1.2.4. Rappels des principales transformations du cycle de l'azote.

(Figure n° 2)

Nous présentons un schéma du cycle de l'azote dans le système sol-plante suivant la structuration des compartiments que nous avons choisie. Il s'agit d'un système ouvert dans lequel existent des entrées et des sorties qui sont figurées par des flèches. Ces entrées et ces sorties sont plus ou moins dépendantes du système de culture choisi.

A l'intérieur du compartiment sol, nous distinguons en fait deux catégories d'azote : l'azote minéral qui représente l'aliment azoté principal de la culture et l'azote organique qui représente le stock d'azote du sol. Enfin, les transferts d'azote ont lieu entre le compartiment du sol et celui de la plante. Il s'agit des mobilisations et des restitutions.

Nous rappellerons ici les principales transformations du cycle de l'azote.

1.2.4.1. Minéralisation.

La minéralisation, c'est-à-dire la transformation de l'azote organique en azote minéral est un processus biochimique bien connu dont les principales phases sont les suivantes :

Composés = Azote organique — Azote ammoniacal — Azote nitrique
Réaction = Ammonisation Nitrification.

- L'ammonisation est un processus de dégradation biologique dû à des microorganismes divers. C'est le passage de l'azote protéïque à l'ammoniac.
- La nitrification est une oxydation de l'azote qui peut être décomposée en :

Nitrosation (a) $NH_4^+ + \frac{3}{2} O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O + 2H^+$

Nitratation (b) $NO_2^- + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow NO_3^-$

La réaction (a) est utilisée par Nitrosomonas pour couvrir ses besoins en énergie libre pour réduire Co_2, la réaction (b) par Nitrobacter pour les mêmes raisons.

Ces organismes sont caractérisés par une certaine lenteur de croissance (10 à 40 heures) et par une résistance aux conditions alternativement favorables et défavorables. Leur condition optimum de croissance se situe entre 30 et 35° en milieu aérobie. On peut trouver des populations de bacteries nitrifiantes dans des sols acides pH 4 à 5 mais leur pH optimum de croissance est de 7 à 8.

En fait la nitrification n'est pas le monopole de ces bacteries (Dommergues - 1970). Un certain nombre d'hétérotrophes sont capables de former des nitrates à partir de N-organique ou de N-NH_4. La nitrification peut être le fait de bacteries, d'actinomycètes, de champignons qui ont une grande diversité d'exigences écologiques.

Dans les sols acides tropicaux, les bacteries ne sont certainement pas les seuls agents nitrificateurs.

1.2.4.2. Réorganisation.

La formation de la matière organique du sol se fait par la décomposition des résidus végétaux sous l'action d'une microflore extrêmement variée. Les constituants carbonés sont décomposés plus ou moins rapidement en produits du métabolisme microbien et de l'azote est réorganisé en des produits plus ou moins complexes.

On peut distinguer par exemple les molécules simples = sucres et acides aminés et les molécules complexes = acides humiques et fulviques qui contiennent eux-mêmes un certain nombre d'acides aminés combinés à des phénols ou à des quinones- (Flaig. 1955-1959 Ladd and Butler 1964).

1.2.4.3. Dénitrification.

Ces processus de minéralisation et réorganisation ne se produisent pas sans pertes.

La dénitrification biologique est la réduction biologique du nitrite en des composés gazeux conduisant à une perte nette d'azote par volatilisation. Le processus est une réduction des nitrates en milieu araérobie du genre

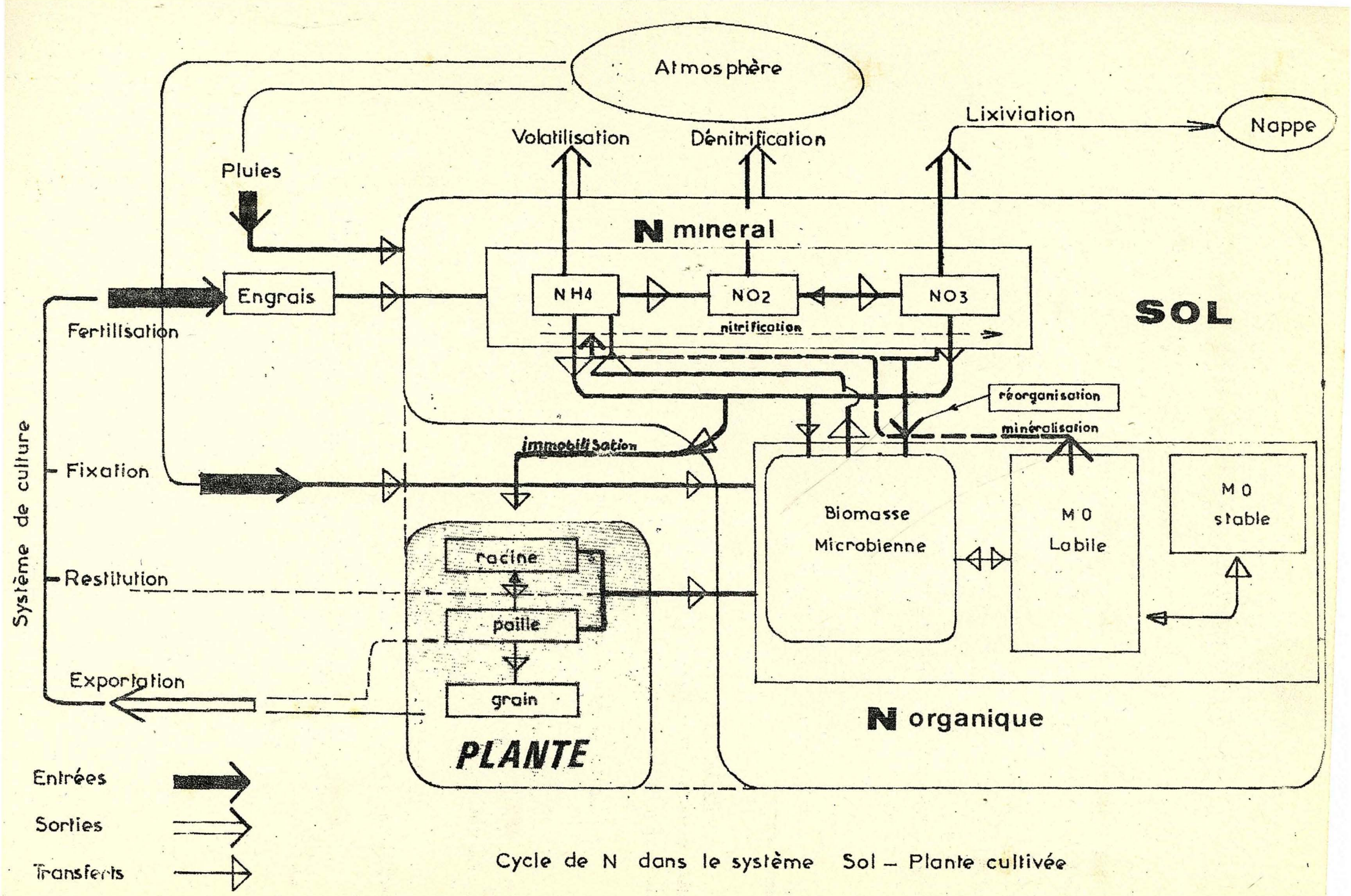
$$C_6H_{12}O_6 + 4\,NO_3^- \rightarrow 6\,CO_2 + 6H_2O + 2N_2$$

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow N_2O \rightarrow N_2.$$

Les agents de dénitrification sont des anaérobies facultatifs. Si la tension d'oxygène s'élève ils l'utiliseront préférentiellement au nitrate comme accepteur d'électrons.

La dénitrification est un processus beaucoup plus rapide que ceux de la nitrification.

La dénitrification peut être un phénomène chimique et avoir lieu en milieu aérobie.



Cycle de N dans le système Sol – Plante cultivée

Fig. nº 2

Abréviations utilisées pour l'azote.

Azote = N Agronomiquent 1 unité = 1 kg/ha

Azote total du sol (méthode KJELLDAHL) = NT exprimé en ‰ ou en ppm (10^{-6})

Azote organique du sol = N organique

Azote minéral = N min. (exprimé en ppm)

Azote ammoniacal	N-NH4	
Azote nitreux	N-NO2	nitrite
Azote nitrique	N-NO3	nitrate

Azote gazeux = N2

Azote provenant de l'engrais = N eng.

Azote marqué isotopiquement = N 15

Azote minéral marqué = N 15 min. ou N min. N15

Azote engrais marqué = N 15 eng. ou N eng. N15

Sp	=	Sous parcelle recevant de l'engrais marqué
Sp A	=	Sous parcelle sur laquelle N- marqué est apporté au semis
Sp B	=	Sous parcelle sur laquelle N-marqué est apporté en couverture pendant le cycle.
I	=	Pieds intérieurs à la sous parcelle
E	=	Pieds extérieurs à la sous parcelle
Ca%	=	Coefficient d'utilisation apparent de l'engrais
Cr%	=	Coefficient d'utilisation réel de l'engrais
K%	=	Contribution de l'engrais à l'alimentation de la plante
QN	=	Quantité d'Azote en g ou kg
M.S.	=	Matière sèche (paille séchée à 70°)

Sous certaines conditions on peut observer une volatilisation de l'azote à partir du nitrite formé suite à des réactions purement chimiques telles que :

$$3\ HNO_2 \rightarrow 2\ NO + HNO_3 + H_2O$$

$$2\ NO + O_2 \rightarrow 2\ NO_2$$

$$3\ NO_2 + H_2O \rightarrow 2\ HNO_3 + NO$$

$$2\ NO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HNO_2$$

ou par la réaction de Van Slyke avec un acide aminé :

$$RNH_2 + HNO_2 \longrightarrow R\text{-}OH + H_2O + N_2$$

ou simplement $NH_3 + HNO_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$

Les pertes gazeuses se font sous forme d'un ou de plusieurs de ces composés azotés suivant les conditions du milieu.

(ALLISON 1955-1963/WISLER et DELWICHE 1954/NOMMIK 1956/BREMNER-NELSON 1968-69 / GUIRAUD-BERLIER 1969).

CHAPITRE II
CONDITIONS EXPERIMENTALES

2.1. Etudes en milieu naturel.

Un certain nombre de dispositifs expérimentaux ont été installés dans des stations de l'IRAT pour suivre les effets d'apports répétés d'azote et de matière organique (paille ou compost) sur les rendements agricoles, l'évolution du sol et les pertes d'éléments minéraux par lixiviation.

On pensait notamment qu'il était possible de stocker l'azote de l'engrais dans le sol en apportant de la matière organique à celui-ci. En effet, la forme de réserve de l'azote est la forme organique. Le problème des réserves azotées du sol est donc lié étroitement à la dynamique du carbone. Le rapport C/N étant relativement constant, pour accroître d'une unité les réserves azotées il faut apporter au minimum 10 unités de carbone. Théoriquement donc, cette opération est possible.

S' il s'agit de paille à C/N élevé, la perte de carbone sous forme de Co2 sera importante.

S' il s'agit de compost à C/N faible, la réorganisation se fera sans grosses pertes de carbone.

Ce phénomène permettrait le maintien, voire l'augmentation de la fertilité du sol.

Ces essais servent à déterminer l'optimum économique de la fumure azotée correspondant à un équilibre économiquement valable entre la fertilisation et la mobilisation par la culture, en tenant compte de l'évolution de la fertilité du sol à long terme.

2.1.1. Dispositifs de l'expérimentation.

Nous présenterons un certain nombre d'essais implantés sur les stations de Bouaké et de Gagnoa qui sont tous basés sur le même principe expérimental.

Il s'agit d'essais agronomiques disposés selon la méthode des blocs de Fisher. Les traitements étudiés sont d'une part l'influence d'enfouissements de matière organique (paille ou compost) et d'autre part l'influence de la fertilisation azotée. Pour cela, des doses croissantes d'azote sont ajoutées selon le principe des courbes de réponse à un élément, les autres éléments étant ajoutés en quantité suffisante pour ne pas être limitants. L'azote est amené sous forme d'urée dans tous ces essais.

A - Essai Azote - Paille de Bouaké.

Il a été mis en place en 1969 et est cultivé suivant une rotation biennale adaptée à la région Centre :

1ère année = riz

2ème = maïs - coton.

Traitements mis en oeuvre.

- pas d'apport de paille : Mo
- apport de 5 t/ha de paille sèche : M1

L'azote est apporté en deux fois, un premier apport au semis et un second à la floraison - Les doses apportées sont les suivantes en kg/ha (unité) selon les cultures.

U = kg/ha	Riz	Maïs	Coton
No	0	0	0
N1	60	100	60
N2	120	200	120

La présentation des traitements est la suivante :

Trait.	No	N1	N2
Mo	MoNo	MoN1	MoN2
M1	M1No	M1N1	M1N2

Chaque traitement fait l'objet d'une parcelle élémentaire de 140 m2 (20 x 7 m).

Chaque traitement est répété 6 fois par la méthode des blocs - (6 blocs de 6 traitements, soit 36 parcelles sur l'essai).

Utilisation de l'azote 15.

Une partie de l'azote est apportée sous forme d'urée marquée. Compte tenu du coût élevé de l'azote 15 et des résultats obtenus par divers chercheurs, nous avons utilisé de l'urée faiblement enrichie en N-15.

- enrichissement à 1 % de N-15 pour l'étude de l'absorption de N par la plante.
- enrichissement à 5 ou 10 % pour l'étude complète du système sol-plante (traitements N1 et N2 du bloc n° 5 de l'essai et lysimètres).

Les parcelles élémentaires de 140 m2 sont alors divisées en 3 sous-parcelles de tailles inégales.

(Voir le plan d'une parcelle - schéma 3).

- une sous-parcelle pour l'estimation du rendement final, où on applique de l'azote normal (N-14).

- deux sous-parcelles de 6 m2 (1,6 x 3,8 m) sur lesquelles on applique de l'engrais marqué N-15.

- la première sous-parcelle (Sp A) reçoit de l'urée enrichie au premier apport et de l'urée normale au second.
- la seconde (Sp B) reçoit de l'urée normale au premier apport et de l'urée enrichie au second.

Ce dispositif permet de mesurer les coefficients d'utilisations réels de l'azote de chaque épandage ainsi que de suivre cet azote engrais dans le pool de l'azote du sol.

- Le reste de la parcelle situé à l'autre bout par rapport aux sous-parcelles N-15 sert à effectuer des prélèvements de matière sèche pendant le cycle végétatif.

ESSAI STOCKAGE-N- BOUAKE-73-74

PLAN D'UNE PARCELLE

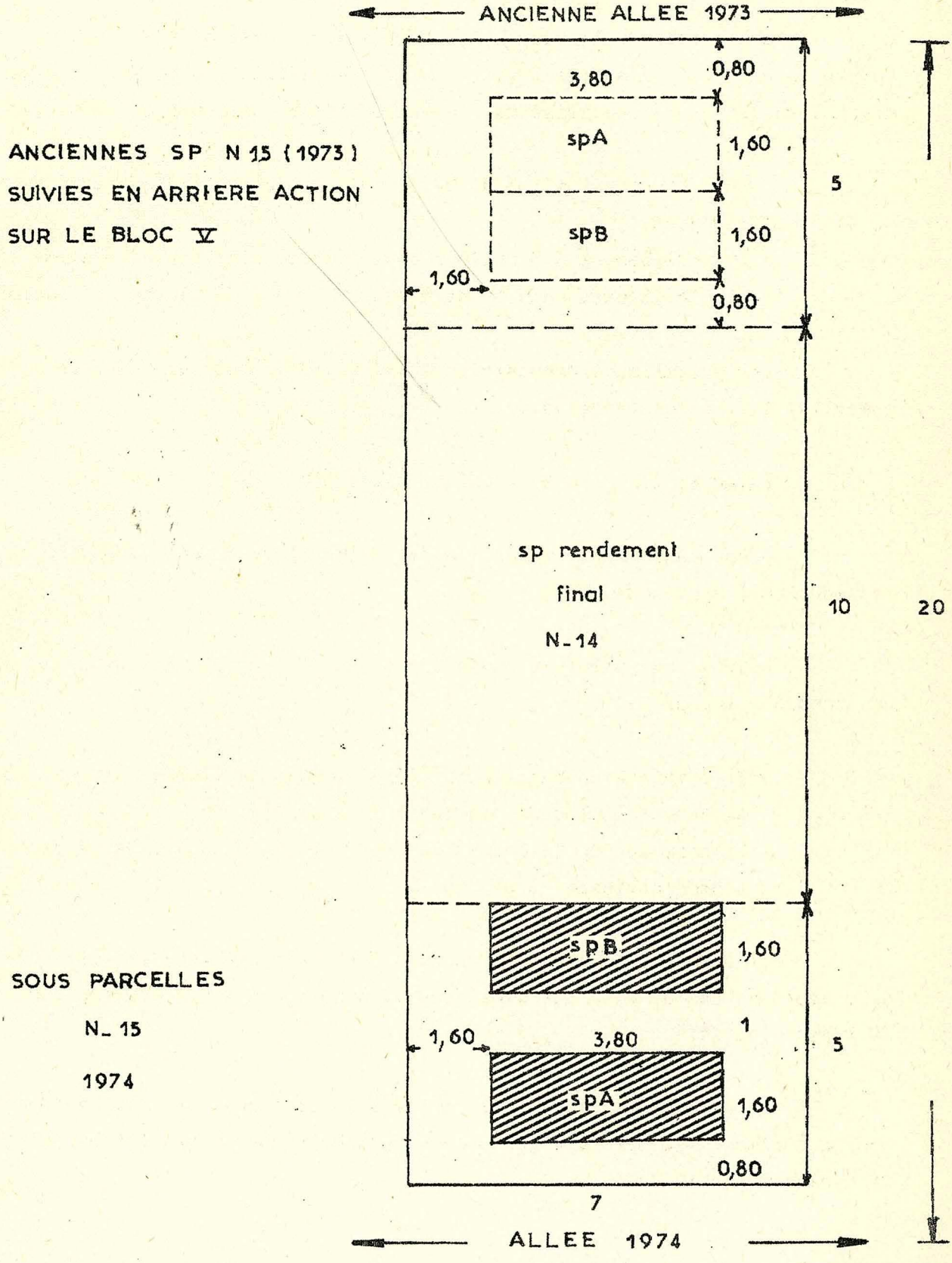
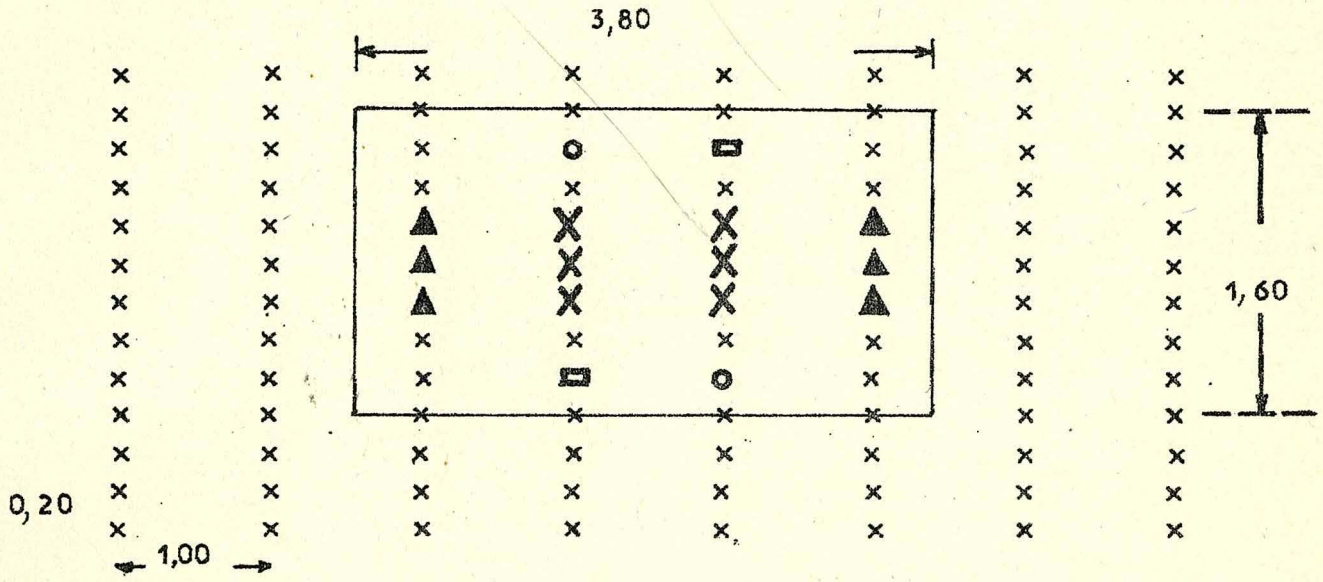


Fig. nº 3

Fig. 4

ESSAI STOCKAGE AZOTE - BOUAKE - 74 -

Plan d'une sous parcelle N-15



▭ Pieds prélevés à 45jours

o Pieds prélevés à 90jours

X Pieds utiles récolte - 120jours

▲ Pieds de garde prélevés à la récolte - 120 jours

La première année d'utilisation de l'azote marqué les sous-parcelles N-15 sont situées d'un côté de la parcelle élémentaire de 140 m2 et la deuxième année, alors que les sous-parcelles 73 sont suivies en arrière-action en 74, les nouvelles sous-parcelles N-15 de 74 sont implantées à l'autre bout de la parcelle. (Voir sur schéma 3).

Etude de l'absorption de N par la plante.

Les prélèvements de plantes sont faits au cours du cycle à la fois dans les sous-parcelles N-15 pour l'analyse de l'azote et de l'enrichissement de N-15 et dans la parcelle rendement pour avoir une estimation de la matière sèche produite à l'hectare, ainsi que la teneur en azote. Ceci permet le calcul des mobilisations de l'azote par la culture :

- 1973 : étude du riz pluvial

5 prélèvements de matière sèche ont été effectués pendant le cycle.

On distingue des prélèvements faits sur une assez grande surface pour l'estimation de la matière sèche et ceux faits sur quelques pieds dans les sous-parcelles N-15 pour l'analyse de l'azote et de l'azote 15.

Ces prélèvements ont été faits aux dates suivantes :
nombre de jours après semis (JAS) = 40 - 65 - 85 - 105 - 135 jours.

- 1974 : étude du maïs

Selon le même principe, on a effectué des prélèvements de plante pendant le cycle.

D'une part pour l'estimation de la matière sèche produite et d'autre part pour l'analyse de N et de N-15 dans ce cas, les pieds de maïs sont prélevés suivant un plan d'échantillonnage systématique en cours de culture étant donné le faible nombre de pieds par sous-parcelle N-15.

A la récolte, les lignes centrales (6 pieds) sont récoltées. Les 2 lignes adjacentes plus près du bord sont récoltées séparement pour contrôle (schéma n° 4).

3 prélèvements ont été réalisés à 45 - 90 - et 1[illegible]0 jours après le semis. Dans les anciennes sous-parcelles N-15 de 1973 du bloc V, on prélève les pieds centraux pour mesurer l'arrière effet de la fumure apportée sur le riz.

- 1974 : coton

L'arrière effet de la fumure apportée sur le maïs est testé en prélevant les plants dans les anciennes sous-parcelles N-15 du maïs.

Etude du bilan en cases lysimétriques.

L'apport d'azote marqué est fait en 1973, sur 10 cuves de sol non remanié de différentes profondeurs : 45 et 80 cm (description dans le chapitre pertes par lixiviation) l'urée enrichie est apportée en deux fois sur le riz suivant 2 doses (N1 et N2) combinées à 2 doses de paille (Mo et M1) comme dans l'essai précédent.

Les mesures sont effectuées sur un certain nombre de percolats d'eau de drainage de 1973 et de 1974 et sur les plants au moment de la récolte (riz - maïs - coton). Des échantillons de sol sont prélevés entre les cultures et analysés (azote du sol N-14 et N-15).

B - Essais de Gagnoa.

a. Essai "Azote - paille" de Gagnoa.

Cet essai a été implanté en 1973 sur la station. Il s'agit d'un essai du même type que le précédent, mais dans lequel 3 niveaux de restitution de paille sont testés. La culture est une culture continue de maïs hybride à 2 cycles par an.

Traitement mis en oeuvre.

Trois doses d'azote combinées à 3 doses de paille (No N1 N2) x(Mo M1 M2) l'urée est appliquée en deux fois (1/2 semis et 1/2 floraison) les doses sont 0-50 et 100 unités (kg/ha d'azote).

La paille est enfouie au labour aux doses de 0-5 t. et 10 t/ha - de matière sèche (M.S.).

Dispositif expérimental :

Il s'agit d'un essai en blocs de Fisher mais dont les parcelles sont divisées (split-splot) en traitement principal et traitement secondaire.

Pour des raisons pratiques de mise en place, le traitement principal est l'apport de paille et le traitement secondaire est d'azote.

La parcelle élémentaire mesure 160 m2 et est divisée en 3 parcelles égales correspondant aux traitements secondaires - les traitements de l'essai sont donc les suivants :

	Azote	0	50u	100u
Paille	...	No	N1	N2
0	Mo	MoNo	MoN1	MoN2
5 t/ha	M1	M1No	M1N1	M1N2
10 t/ha	M2	M2No	M2N1	M2N2

Chaque traitement est répété 8 fois pour l'analyse statistique. On aura donc 8 blocs de 9 traitements soit en tout 72 parcelles.

En plus des 8 répétitions de ces traitements un 9ème bloc est laissé en sol nu sans culture.

b. Essai "Azote - compost" Gagnoa.

L'essai a été implanté en 1971.

La culture est également une monoculture de maïs à 2 cycles par an.

Il s'agit d'une courbe de réponse à l'azote de 0 à 200 unités (kg/ha) par augmentation croissante de 40 en 40 unités, en présence ou non de compost.

Le compost provient de l'humification des résidus de la culture de maïs de l'année d'avant. Ce compost est apporté à la dose de 40 t/ha de compost frais (75 % d'humidité environ)

L'urée est apportée en deux fois : semis et floraison mâle.

Traitements mis en oeuvre.

Il y a douze traitements répartis ainsi :

	Azote	0	40	80	120	160	200
Compost		No	N1	N2	N3	N4	N5
0	Mo	MoNo	MoN1	MoN2	MoN3	MoN4	MoN5
40t/ha	M1	M1No	M1N1	M1N2	M1N3	M1N4	M1N5

Dispositif expérimental.

Il s'agit d'un essai type factoriel 2 x 6, traitements avec 8 répétitions en blocs randomisés. L'essai comporte donc 96 parcelles élémentaires.
La surface élémentaire d'une parcelle est de 7,2 x 6 m = 43,2 m2.

c. Essai "Paille - Compost" - Gagnoa.

Cet essai a été implanté en 1974.
Il s'agit d'une synthèse des deux essais précédents. La culture est également un maïs hybride avec 2 cycles annuels.

Traitements mis en oeuvre.

Nous comparons 2 types d'apport de matière organique = paille 10 t/ha de matière sèche (Mp) compost (Mc) correspondant à la même quantité de paille compostée.

La dose d'azote testée est 100 kg/ha apportée en une seule fois à 25 JAS - (N1) la répartition des traitements est donc la suivante.

		Azote	
		0	100u
		No	N1
0	Mo	MoNo	MoN1
Paille	Mp	MpNo	MpN1
Compost	Mc	McNo	McN1

Dispositif expérimental.

L'essai est factoriel en blocs avec 6 traitements et 6 répétitions (blocs) soit 36 parcelles pour l'essai.

La surface d'une parcelle est de 28 m2.

d. Emploi d'azote marqué par N-15 sur ces essais.

Comme dans l'essai de Bouaké, nous avons utilisé de l'azote 15 pour marquer l'engrais qu'on apportait sur la culture.

Sur 4 répétitions de chacun de ces essais, on a apporté au premier cycle 1974 une partie de l'engrais azoté sous-forme d'urée marquée par N-15. Cet apport est fait suivant le même principe de sous-parcelles de faibles dimensions à l'intérieur des parcelles de l'essai. Chaque parcelle N-15 mesure 2 m de ligne avec deux demi-interlignes de 0,40 m (écartement des lignes de semis de maïs de 0,80 m) et mesure donc 1,6 m2. Elle encadre parfaitement une ligne de maïs (voir schéma n° 4bis).

Nous les avons appelées "subplot" car le terme sous-parcelle était déjà utilisé pour les traitements secondaires de certains de ces essais. L'abréviation utilisée est Sp.
Si l'apport est fait en deux fois, on distingue la Sp A et la Sp B comme à Bouaké.
On récolte la ligne centrale de maïs du subplot et les deux lignes adjacentes séparement (schéma n° 4bis).
On récolte par ailleurs le reste de la parcelle pour déterminer la matière sèche et les rendements sur une grande surface. On détermine la quantité de N-15 contenu dans les maïs des sous-parcelles. On additionne la quantité contenue dans la ligne centrale et celle des lignes adjacentes pour calculer le coefficient d'utilisation en considérant qu'il y a une diffusion latérale de l'azote marqué qui est compensée par de l'azote non marqué.

Dans tous ces essais suivis à Gagnoa nous n'avons donc effectué qu'un seul prélèvement de plante à la récolte.

Nous aurons par le calcul les mobilisations finales par la récolte et non pas l'évolution des mobilisations au cours du cycle comme à Bouaké.

Après la récolte, des prélèvements de sols systématiques sont faits jusqu'à 1 mètre de profondeur pour suivre la répartition de l'azote-engrais dans le sol. Les enrichissements en N-15 de l'urée utilisée étaient de :

5.68 % pour les doses faibles (N1) et
3.23 % pour les doses fortes (N2)

2.1.2. Réalisation des études et utilisation de N-15.

Les recherches concernant les bilans de l'azote ont été réalisées avec des techniques basées sur l'emploi de l'isotope N-15 comme marqueur des engrais azotés.

L'utilisation de l'azote marqué, classique dans plusieurs pays pour ce genre d'étude, est rare dans les organismes de recherche agronomique français, hormis le commissariat à l'énergie atomique (CEA).

L'utilisation de cette technique n'a été rendue possible que par la complémentarité et les compétences d'organismes extérieurs tels que :

- les laboratoires centraux de l'Institut de Recherches Agronomiques Tropicales (Nogent puis Montpellier).
- le service de Radioagronomie du CEA-Cadarache (France)
- l'agence internationale de l'énergie Atomique - AIEA Vienne (Autriche)
- le laboratoire des isotopes de Braunschweig Volkens rode (Allemagne).

Le financement a été assuré par la Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique (DGRST-France) dans le cas de l'essai de Bouaké et d'autre part par l'AIEA sous forme de contrat d'assistance dans le cadre des essais de Gagnoa.

Ces organismes ont notamment assuré la fourniture de l'azote marqué et la possibilité d'effectuer toutes les déterminations isotopiques nécessaires.

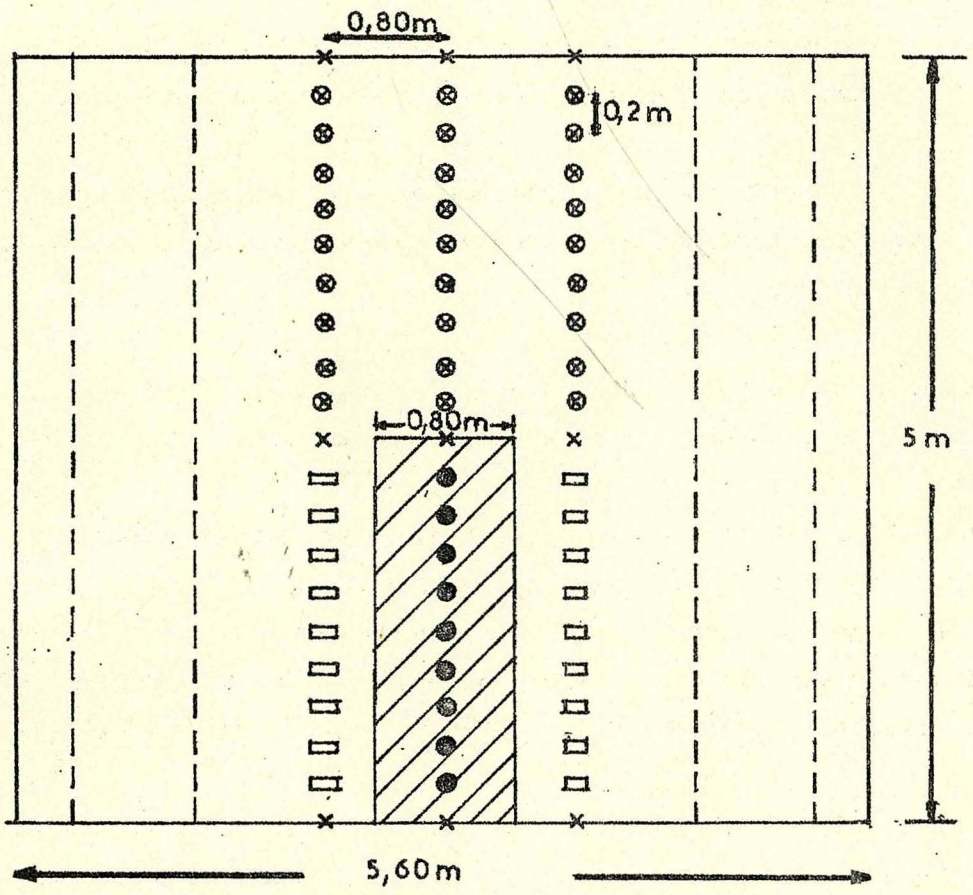
L'AIEA a d'autre part financé la venue d'un expert consultant qui a été le Pr. LAUDELOUT de l'Université de Louvain.

Le but de l'utilisation de l'azote marqué est, rappelons le, de connaitre le sort de l'engrais azoté apporté au sol. En effet, les essais de fumure azotée donnent souvent des résultats difficilement interprétables étant donné l'action d'autres facteurs limitants, comme les conditions hydriques d'alimentation de la plante.

Essai Paille Compost - GAGNOA -

GP 405 à GP 440

PLAN D'UNE PARCELLE N1



— — — Lignes non récoltées

N-15
Echantillons N-15

⊗ Lignes à récolter (N-14)

● Ligne récoltée = Ligne centrale

▭ Lignes récoltées = Lignes adjacentes

Figure 4 bis

Dans le cas de prélèvements fréquents de plants pour suivre l'évolution de la matière sèche et de la mobilisation de l'azote, la méthode d'étude est susceptible d'être moins sensible à des aléas climatiques pendant la culture pour l'interprétàtion des résultats de l'essai. La connaissance du devenir de l'engrais dans un système sol-plante, permettra d'orienter de façon assez précise la fumure azotée d'une culture.

2.1.3. Description du milieu.

Localisation : (Fig.1)

Comme nous l'avons déjà signalé, les études en milieu naturel ont été basées sur deux stations de l'IRAT, à savoir Bouaké et Gagnoa.

Bouaké se trouve au Centre de la Côte d'Ivoire en zone de savane et Gagnoa au Sud-Ouest en région forestière.

	Bouaké	Gagnoa
latitude	7°46' N	6°08' N
longitude	5°6' O	5°56' O
altitude	375	210

Végétation.

Bouaké fait partie du secteur guinéen du domaine mésophile de savane arborée. La végétation est un pseudo-climax anthropogène, (savane herbeuse à arbustive de jachère à évolution progressive vers la forêt mésophile lorsqu'elle est protégée).

Gagnoa fait partie du même domaine mais la végétation est encore en majorité, une végétation arborée semi-décidue.

Climat : (Fig. 5)

Les pluviosités sont caractérisées par 2 saisons des pluies inégalement réparties et irrégulières.

Répartition moyenne des pluies.

mm	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Bouaké	19	50	76	118	105	188	111	92	157	123	46	15	1103
Gagnoa	34	63	144	160	185	220	96	65	173	160	103	47	1450

/1ère saison des pluies/ /2ème saison /

Autres renseignements climatologiques. (Moyennes sur 20 cm)

	Insolation nombre d'heures	Temp. degré	Humidité %	Nombre jours pluie	ETP moy. piche
Bouaké	2063	25°	75 %	110 j.	1050
Gagnoa	1788	25°	81 %	144 j.	530

Sol. (voir annexe : descriptions et analyses)

Les sols sont des sols ferrallitiques moyennement ou fortement désaturés rajeunis et remaniés sur arène ferruginisée dérivée de granite. Ces sols sont cultivés et partiellement résaturés dans l'horizon supérieur par les apports d'engrais successifs.

Le sol de Bouaké est très riche en gravillons ferrugineux. On distingue un horizon labouré contenant environ 20 % de gravillons, de couleur brun-foncé de texture argilo-sableuse reposant sur un horizon gravillonnaire (70 % éléments grossiers) brun rouge légèrement plus argileux présentant des pénétrations de matière organique.

A partir de 50 à 100 cm, selon les endroits, on observe un horizon d'altération sableux bariolé à dominance ocre brûnâtre. Sa structure est massive et il est sujet à l'induration par endroits. L'argile est essentiellement de la kaolinite (95 %).

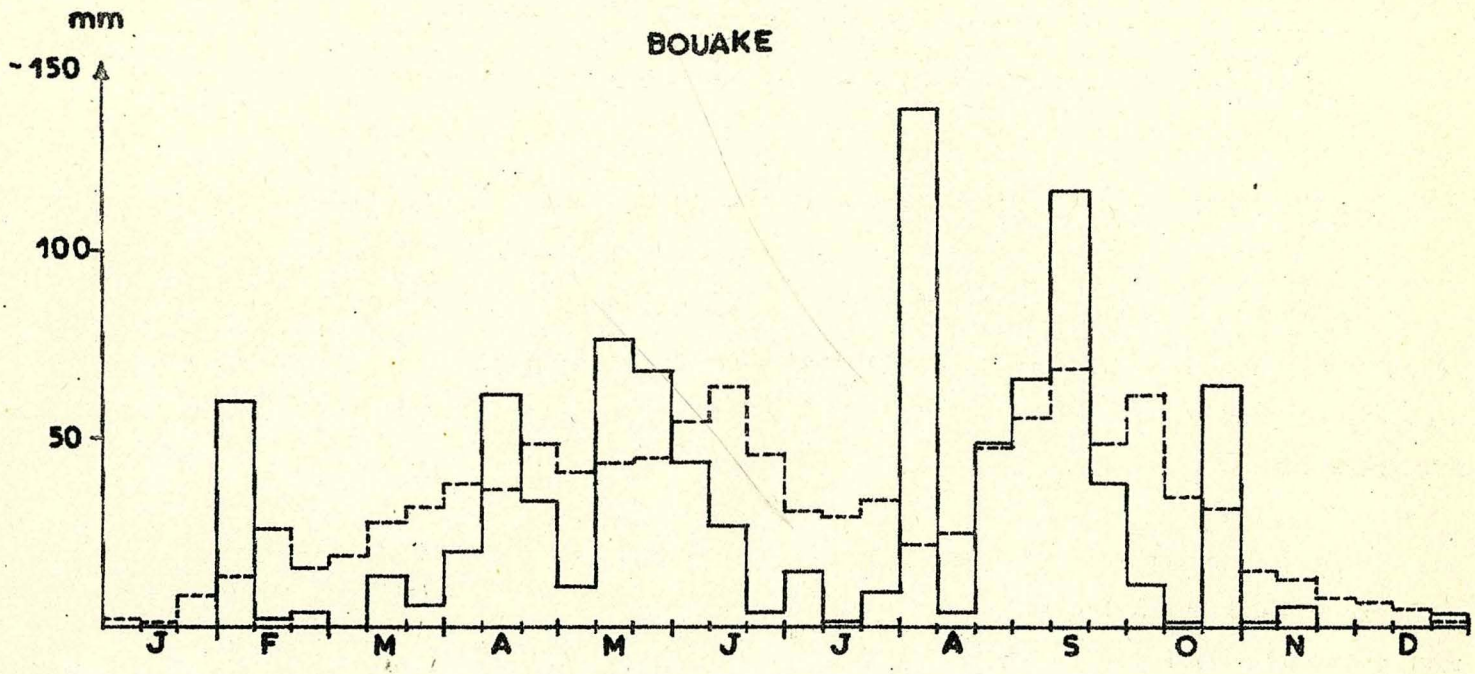
La structure est assez bien développée dans l'horizon de surface mais peu développée dans les autres horizons. La perméabilité est élevée (100 cm/heure)* en surface. La réserve hydrique assez faible : la capacité au champ est de l'ordre de 14 %, la densité apparente de 1,5 en surface et 1,6 à 90 cm. La porosité calculée est de 35 %. L'horizon gravillonnaire est peu pénétrable par les racines, sauf à l'occasion de fissures ou de pénétrations de matière organique dans les gros pores.

Le sol de Gagnoa présente un profil très variable suivant les emplacements. Il est rarement homogène sur un essai. Ceci en raison de son remaniement : une nappe gravillonnaire débute dans le profil à une profondeur qui varie de 0 à 120 cm selon les endroits. Il existe également un gradient de texture suivant la pente. En haut de pente (essai Azote-paille) la teneur moyenne en argile est de 35 % alors qu'en bas de pente (essai paille-compost) elle n'est que de 10 %.

* Test de perméabilité HENIN (ROOSE - 1972)

PLUVIOMETRIE DECADAIRE

1973



PLUVIOMETRIE DECADAIRE

1974

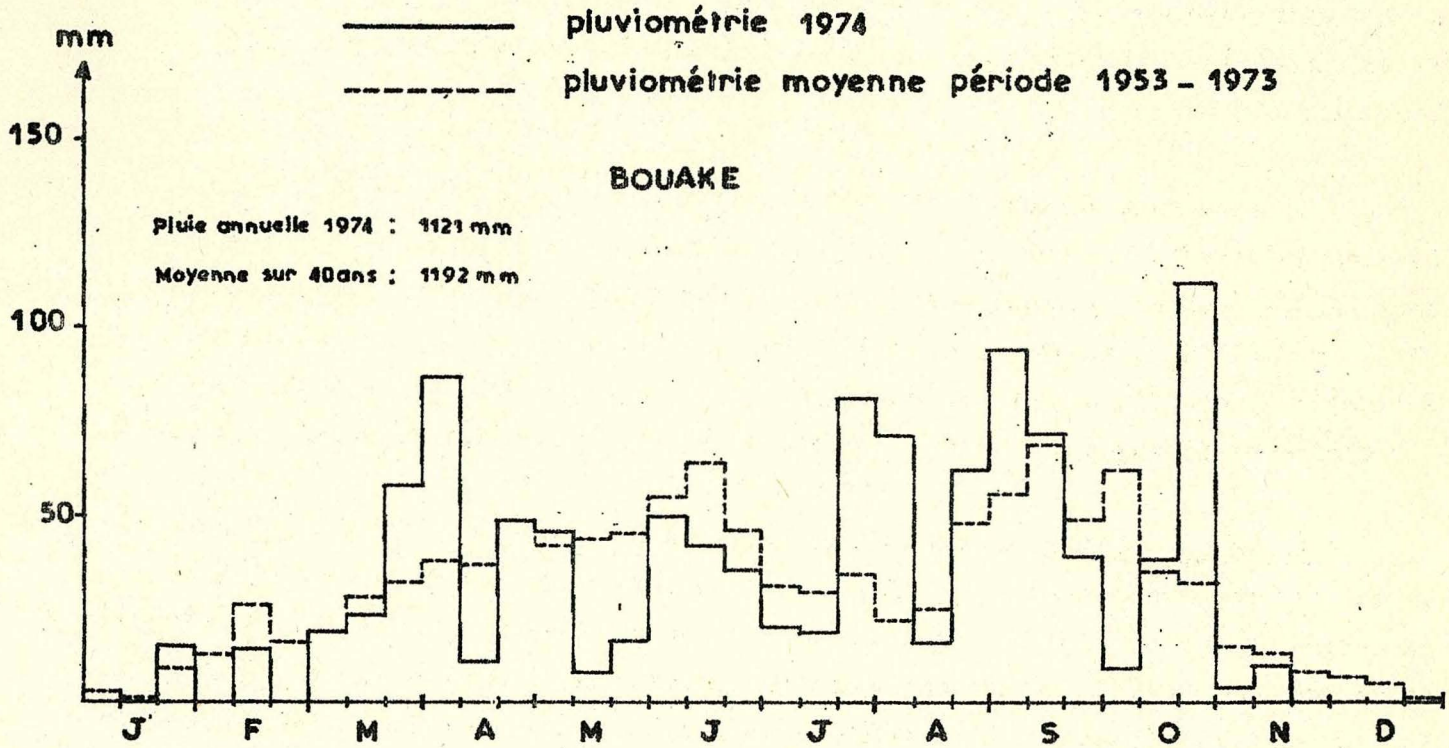


Fig nº 5

GAGNOA

PLUVIOMETRIE DECADAIRE

1974

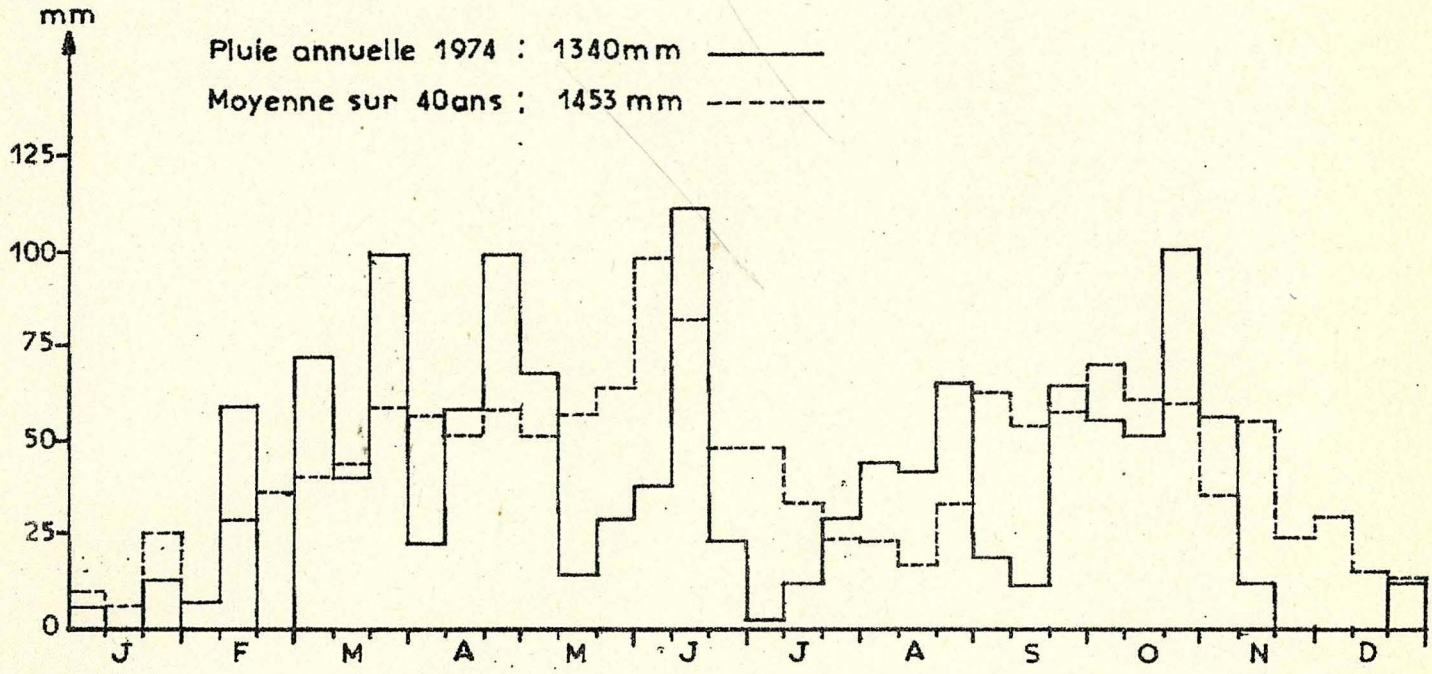
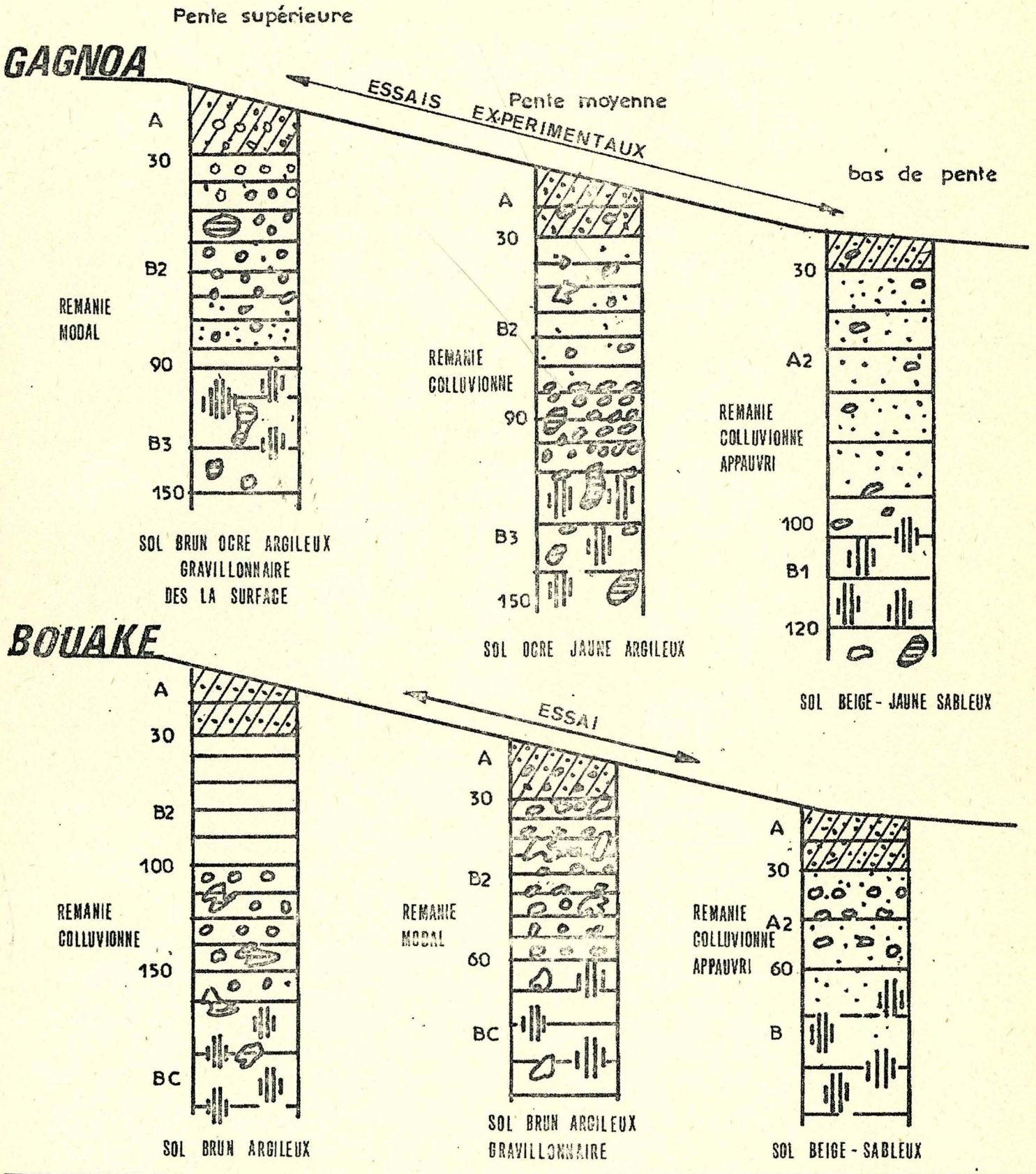


Figure 5 bis

TOPOSEQUENCE DES SOLS ETUDIES

SOLS FERRALLITIQUES REMANIES SUR GRANITE



Les lysimètres ont été installés à mi-pente à un endroit où le profil 0-80 cm ne comporte pas ou peu de gravillons.

A cet endroit, le sol est de texture LAS à AS avec une structure assez peu marquée.

L'horizon travaillé 0-25 cm de couleur brun jaunâtre, avec 25 % d'argile environ, repose sur un horizon brun jaunâtre à jaune brûnâtre plus argileux. A partir de 90 cm se développe un système reticulé de taches rouilles avec une tendance à une orientation verticale. A 120 cm apparaît la nappe de gravillons ferrugineux avec quelques débris de cuirasse.

Ce sol est très poreux avec une densité de 1,4 en surface et de 1,6 en profondeur. Le profil est pénétrable par les racines et se fissure en saison sèche. L'argile est principalement de la kaolinite.

Modelé et mise en valeur.

Dans les deux sites il s'agit de versants de plateaux en pente douce de 3 à 4 %. Ce sont des glacis d'érosion colluviaux. Les essais sont installés perpendiculairement à la pente en dispositifs antiérosifs simplifiés. La largeur des bandes des essais anciens est de 50 mètres, ce qui s'est avéré trop large en raison de l'érosion. Les nouveaux essais ont été réalisés après 1972 sur des bandes plus étroites.

Ces bandes cultivées sont séparées par des talus, fossés et bandes engazonnées qui limitent l'érosion lors des pluies particulièrement violentes. Ces sols ferrallitiques de mi-pente font place vers l'aval à des sols sableux hydromorphes. D'une matière générale, aussi bien sur le plateau que sur les versants, le type de sol est extrêmement variable car on passe de profils sans gravillons qui font penser à des sols non remaniés typiques à des sols très riches en gravillons remaniés modaux, voire indurés, ceci en quelques dizaines de mètres. Il est donc tout à fait illusoire de vouloir trouver une zone de sol homogène pour l'installation d'un essai agronomique et il existe parfois de fortes variations lors de l'interprétation des essais, qui sont dues aux blocs et à l'hétérogenéïté des sols.

Matière organique des sols.

Il est utile de donner un bref aperçu sur la nature de la matière organique originelle de ces types de sol, d'après une étude de PERRAUD (1971) portant sur l'étude de la matière organique des sols sous végétation naturelle.

A Gagnoa les conditions du milieu favorisent une humification rapide et la formation d'un humus type Mull.

Dans l'horizon humifère A11, les caractéristiques sont :

- la fraction légère (obtenue par densimétrie) représente 15 à 25 % du carbone total.
- la matière extractible par les agents alcalins est importante = 30 à 35 %
- rapport acide fulvique/acides humiques = 1,0 à 1,6
- C% 1 à 2 % C/N 9 à 16

Dans l'horizon A12 (5 à 25 cm) le pourcentage de la fraction légère devient faible. Le rapport AF/AH devient plus important (1,5 à 2,3) et le pourcentage d'acides humiques gris est de 50 à 60 %.

Dans les horizons sous-jacents, on ne trouve que des traces d'acides fulviques et humiques. La fraction lourde de la matière organique bien polymérisée est liée au fer et aux argiles. Il s'agit en partie d'une humine surévoluée intimement liée à la matière minérale. Sa teneur est de 10 % environ de l'humine totale.

A Bouaké. Dans l'horizon A11 les caractéristiques sont les suivantes :

- la fraction légère est inférieure à 15 %
- rapport acides fulviques/acides humiques de 0.9 à 1.1
- acides humiques gris supérieurs à 60 %
- C % = 3 % - C/N 10

Dans l'horizon A12, la fraction légère est faible inférieure à 10 %.

- la matière organique extractible (alcalins) est faible 20-25 %
- le rapport AF/AH - 0.8 à 1.3
- acides humiques gris 63 %.

Dans l'horizon inférieur les teneurs en acides fulviques et humiques diminuent rapidement, mais le rapport reste à peu près constant. L'humine est constituée par environ 15 % d'humine surévoluée.

Dans les deux cas, il est à noter que la position topographique dans le modelé joue sur les quantités des différentes fractions de la matière organique mais que la qualité des humus ne varie pas. (AF/AH et AHG % constants).

En conclusion, on remarque qu'en savane le degré d'humification et le taux de polymérisation des composés extractibles sont supérieurs.
Des tests biologiques permettent également de distinguer les deux types de sol :

- le coefficient de minéralisation et l'activité déshydrogénasique sont très faibles en forêt et plus élevés en savane.
- l'uréase et l'asparaginase sont également très faibles en forêt
- les tests saccharase - amylase - glucosidase des horizons de surface sont très faibles pour les sols forestiers.

Il y a donc bien des types de matière organique différents entre la zone de Gagnoa et la zone de Bouaké. On peut simplifier en disant qu'à Gagnoa, la matière organique est peu polymérisée, alors qu'à Bouaké elle l'est plus.
Par contre les processus biologiques sont plus intenses à Bouaké qu'à Gagnoa.

2.1.4. Conditions de réalisation des essais 1973-1974.

A Bouaké, sur l'essai "Azote-paille" et sur les cuves.

* Pour la culture de riz en 1973: La variété utilisée est la variété rustique Iguape Cateto. Il s'agit d'une variété à bon potentiel de rendement (50 qtx/ha) et adaptée en région Centre étant donné sa résistance relative à la sécheresse. Le cycle est de 135 jours. Ce riz est semé en lignes à 40 cm avec une densité de 35 kg/ha. Les conditions de culture ont été bonne jusqu'à la fin septembre. A partir de ce moment les pluies ont été insuffisantes pour permettre une bonne maturation du riz, d'où un échaudage important et une limitation des rendements. De ce point de vue, on ne peut interpréter cet essai avec la seule utilisation des rendements à la récolte. L'évolution de la matière sèche pendant le cycle fut suffisamment suivie pour autoriser son interprétation.

* Sous culture de maïs et de coton.

Le maïs est semé début avril, dès les premières pluies importantes, en lignes séparées de 1 mètre avec les plants à 20 cm. C'est un hybride double H507 à fort potentiel (10 t/ha). Le cycle est de 110 jours. Une sécheresse très marquée en mai a limité le développement végétatif du maïs, d'où une baisse des rendements par la suite à 40 % du potentiel. Une fin des pluies brutale en juillet est également une cause de cette réduction.

La réduction a surtout marqué les traitements fortement fertilisés N2 qui ont eu un rendement inférieurs à N1 alors que dans de bonnes conditions ils auraient dû être plus élevés.

Le coton (variété Allen) a été semé après la culture de maïs. Le semis a été trop tardif (14/8) et de ce fait l'arrêt des pluies pendant la fructification a fortement limité les rendements.

Un prélèvement de matière sèche réalisé au début de la saison sèche au stade floraison et un diagnostic foliaire ont permis l'estimation de la matière sèche produite, le niveau de nutrition minérale et l'interprétation de l'essai.

A Gagnoa, sur les essais "Azote-paille" "Azote-compost" et "Paille-compost".

Les trois essais, ainsi que les cuves lysimétriques ont été cultivés en maïs H507, à raison de deux cycles. Le premier cycle s'est réalisé dans d'assez bonnes conditions et les rendements sont corrects.

Le deuxième cycle n'a pu être semé dans les temps normaux en raison d'une période sèche marquée. De ce fait la culture trop tardive a souffert de la sécheresse lors de la formation des grains, spécialement pour un des essais semé en dernier.

Dans cette étude, seul le premier cycle fait l'objet d'une interprétation. Il faut cependant remarquer que généralement le premier cycle de maïs répond assez peu à la fertilisation azotée alors que le deuxième cycle répond de manière très nette à des doses croissantes d'azote.

2.2. Etudes en milieu contrôlé :

Pour compléter les études au champ, nous avons été amenés à réaliser un certain nombre d'expérimentations en milieu contrôlé, c'est-à-dire en petits pots non cultivés ou en vases cultivés. Ce sont en général des tests de minéralisation ou des tests biologiques de nutrition azotée.

Le sol choisi provient généralement des essais au champ cités. Il s'agit de sols ayant subi des traitements agronomiques différents en conditions naturelles et qui peuvent avoir acquis des caractéristiques physico-chimiques différentes en fonction des traitements.

Dans certains de ces tests, nous avons également utilisé le principe du marquage de l'engrais avec N-15.

a) Tests biologiques de culture en vases.

On utilise des petits pots contenant peu de sol et on cultive une graminée pendant un temps correct (3 semaines). L'engrais apporté est marqué par N-15. L'analyse après ce laps de temps de la plante et du sol permet le calcul du coefficient d'utilisation de l'engrais par la plante et le suivi du devenir de cet azote-engrais dans les diverses fractions de l'azote du sol.

Si la dose d'azote engrais apportée est uniforme, on peut ainsi mettre en valeur l'effet du sol sur cette dynamique de l'azote-engrais. Par exemple, il est possible de comparer l'effet des traitements agronomiques subis par le sol au champ sur cette dynamique en pots.

On caractérise ainsi l'effet des traitements réalisés dans les essais au champ par une méthode simple et rapide.

b) Tests de minéralisation.

On peut également tester les sols et comparer les effets des traitements subis par les sols cultivés par des tests de minéralisation.

Il s'agit alors de petits pots dans lesquels on met du sol sec. On humidifie le sol à une humidité voulue et on suit la dynamique de l'azote minéral pendant un temps court correspondant à la période d'augmentation rapide des quantités d'azote minéral. Ces tests servent à suivre la cinétique du phénomène de minéralisation de l'azote du sol et également le devenir d'un engrais azoté ajouté au sol pendant des courtes périodes. Les détails de ces tests seront donnés dans les chapitres relatant ces expériences.

CHAPITRE III.

RESULTATS

3.1. MINERALISATION ET REORGANISATION.

L'étude de la minéralisation sur des temps relativement courts montre la rapidité et la complexité du cycle, en particulier de la nitrification et de la réorganisation.

L'inverse de la minéralisation c'est-à-dire le passage des formes d'azote minéral à l'état d'azote organique est appelé tantôt immobilisation, (Soil Science Society of America) tantôt réorganisation (DROUINEAU - 1965). Si ce phénomène est brutal, on parle aussi de blocage. Il convient de faire remarquer qu'en dosant les formes d'azote minéral, on mesure la résultante des phénomènes d'assimilation et de désassimilation de l'azote. L'ensemble constitue le "turn-over" des Anglo-Saxons.

Ces phénomènes sont très compliqués dans le milieu naturel. En effet, les cultures ont une influence nette sur ces phénomènes par l'intermédiaire de la rhizosphère. Ceci a été mis en évidence par de nombreux chercheurs dont BLONDEL au Sénégal (1970-71).

La minéralisation semble se faire à partir d'une réserve relativement limitée et renouvelable et progresser à travers une succession d'équilibres. La minéralisation et la réorganisation au champ restent sous la dépendance des variables réelles.

On peut définir la fourniture d'azote d'un sol en prenant par exemple comme facteurs, l'intensité, la cinétique de la minéralisation, les quantités et les formes d'azote mobile qui régissent l'alimentation azotée de la plante.

Un sol donné présente une certaine capacité de minéralisation dans les conditions du milieu. Cette capacité est la quantité annuelle maximum d'azote minéral libérable par la matière organique labile. Ce même sol présente une capacité déterminée de réorganisation qui correspondrait à la quantité maximum d'azote qu'il est capable de réorganiser au sein de sa matière organique.

Enfin, ces transformations se font avec une intensité et une cinétique propre au sol et aux conditions du milieu. Nous étudierons ces transformations de l'azote avec différentes techniques dans le but d'approcher les mécanismes de la minéralisation de N du sol et de l'alimentation azotée de la plante.

3.1.1. Intensité de la minéralisation.

Dynamique de l'azote dans un sol cultivé de Bouaké.

Les besoins en azote d'une même espèce, varient non seulement d'une année à l'autre mais aussi pendant le cycle de végétation d'une même année. L'alimentation dépendra donc du degré de synchronisme entre la disponibilité de l'azote dans le sol, de la disponibilité en eau, et de la demande de la plante.

De la sorte, une mesure donnée, par exemple N minéral, à un instant déterminé n'est qu'une résultante momentanée d'un ensemble complexe de phénomène. Cette mesure n'a pas d'intérêt pratique.

Par contre des mesures fréquentes permettent de suivre la dynamique pendant la culture, voire pendant l'année entière. Si l'on couple ces mesures à l'estimation de la mobilisation d'azote par la culture et aux mesures de pertes par lixiviation, on a une idée suffisamment juste de la minéralisation de l'azote du sol de son évolution dans le système et de la quantité minéralisée.

Il est intéressant dans ce genre de détermination de comparer plusieurs traitements afin de voir l'influence des engrais azotés sur cette dynamique ainsi que leur devenir.

Ce travail nécessite de multiples prélèvements dans le temps et des dosages en nombre considérable.

On peut citer à ce sujet les travaux de HEBERT (1960) CHABANNES(1961) CHABANNES et BARBIER (1963-1964) - BLONDEL (1970-1971) REMY (1975).

Nous mentionnerons particulièrement ceux de CHABANNES et BARBIER qui ont été faits dans le cadre d'essais de longue durée avec des enfouissements de paille. GADET et SOUBIES (1962) ont étudié également les premiers en France la dynamique et le bilan de l'azote en cases lysimétriques en utilisant de l'azote marqué par N-15. Des expériences de ce type ont été reprises parGUIRAUD (1969-1975).

En s'inspirant des méthodes pratiquées par ces divers auteurs nous avons voulu suivre nos essais de fumure azotée pluriannuels.

L'étude de la dynamique de l'azote a été faite uniquement à Bouaké pour les questions pratiques de réalisation des prélèvements et des analyses. Cette étude permet d'apprécier la minéralisation de l'azote du sol selon les traitements et d'apprécier l'influence des facteurs du milieu sur ses fluctuations. On peut également suivre, grâce au marquage de l'engrais, le devenir de N-engrais dans le pool de l'azote du sol.

Matériel et Méthodes.

Cette étude s'est faite parallèlement à celle de l'absorption de l'azote par les cultures de riz et de maïs sur l'essai "Azote-paille" de Bouaké en 1973 et 1974.

- Les traitements étudiés sont ceux de l'essai, soit 6 traitements (Mo - M1 x No - N1 - N2).
- Les prélèvements sont faits sur le bloc 5 de l'essai, d'une part sur les sous-parcelles recevant l'engrais marqué par N-15 (Sp A et Sp B), d'autre part dans la grande parcelle de 70 m2 recevant l'engrais non marqué. (Voir schéma des parcelles précédemment).
- Les échantillons de terre sont pris à la tarière et chacun d'entre eux est obtenu par le mélange de plusieurs prélèvements : (10 pour 70 m2 et 3 pour les sous-parcelles de 6 m2).

- On a distingué en 1973 3 horizons : 0 - 10 cm, 15 - 25 cm] Horizon labouré, 25 - 45 cm

et 2 horizons en 1974 : 0 - 25 cm et 25 - 45 cm.

- Les prélèvements sont faits systématiquement au Centre d'un interligne

- 17 prélèvements successifs ont eu lieu pendant la culture du riz en 1973 et 18 pendant les cultures du maïs et du coton en 1974.

Analyses réalisées.

- Extraction de l'azote minéral du sol frais par agitation avec une solution normale de KCl.

- Détermination de l'humidité du sol frais

- Dosage des formes minérales de l'azote par colorimétrie pour N-14, par distillation pour N-15.

- Calcul des teneurs en ppm (partie pour million) de sol sec.

- Détermination du rapport isotopique pour chaque forme minérale par la mesure de N-15 au spectrographe de masse (CEA-Cadarache).

- D'où le calcul à partir de l'enrichissement (E %) et de la quantité présente (ppm) d'azote extrait du sol, de la quantité d'azote provenant de l'engrais dans chaque forme minérale (NH_4^+ et NO_3^-).

Résultats et discussion.

Dynamique de l'azote.

Note : Les résultats de dosages sont représentés sur les graphiques :

Riz n° 6 = N nitrique n° 7 = N ammoniacal

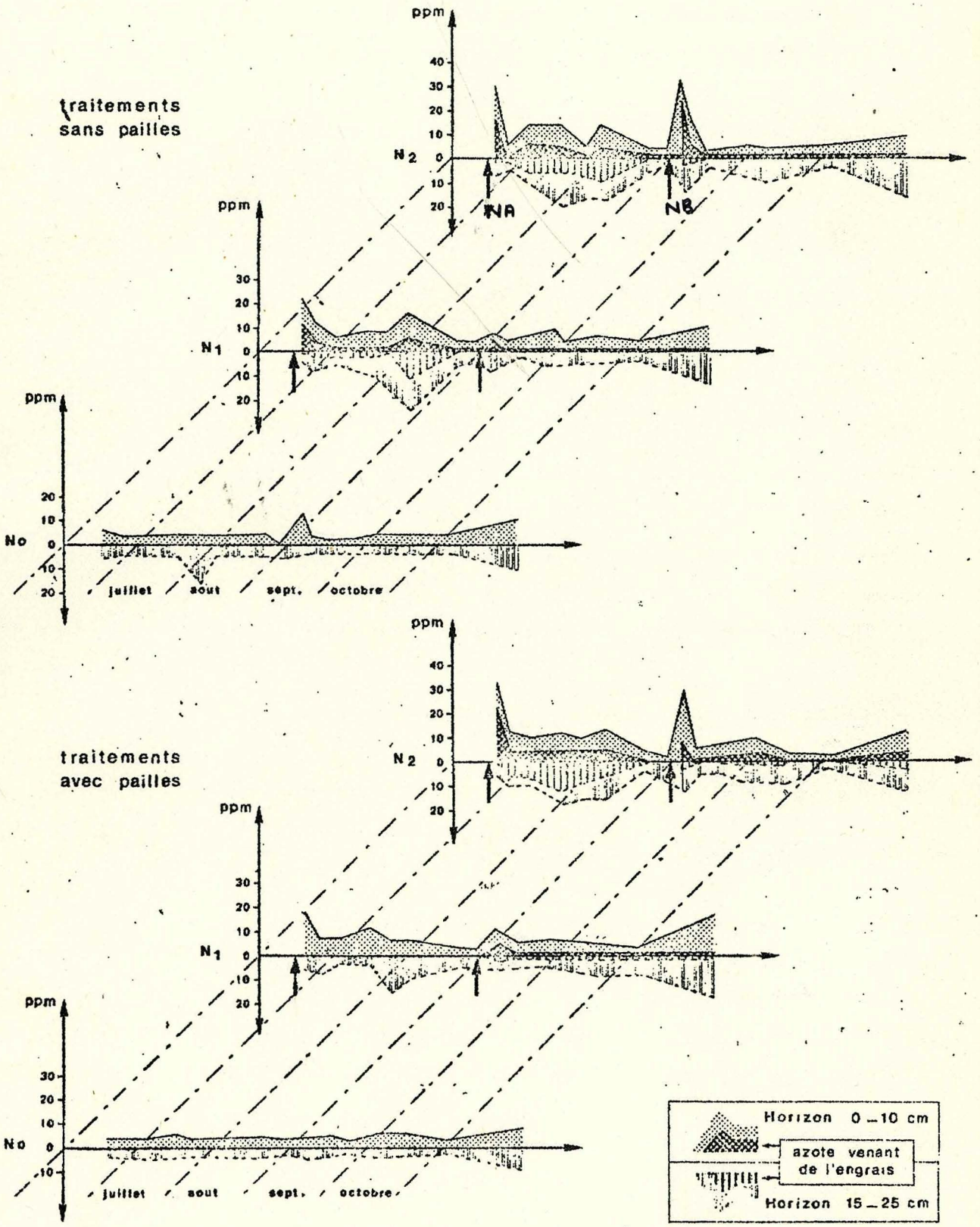
Maïs - Coton n° 10 = N nitrique n° 9 = N ammoniacal.

Les dynamiques observées sous les traitements No-N1-N2 avec ou sans paille sont représentées sur un même graphique en perspective cavalière.

Les variables reportées sur ces graphiques sont des variables intensives : concentration en azote en parties pour million (ppm) du sol sec.

EVOLUTION des TENEURS en AZOTE AMMONIACAL du SOL
sous culture de riz pluvial

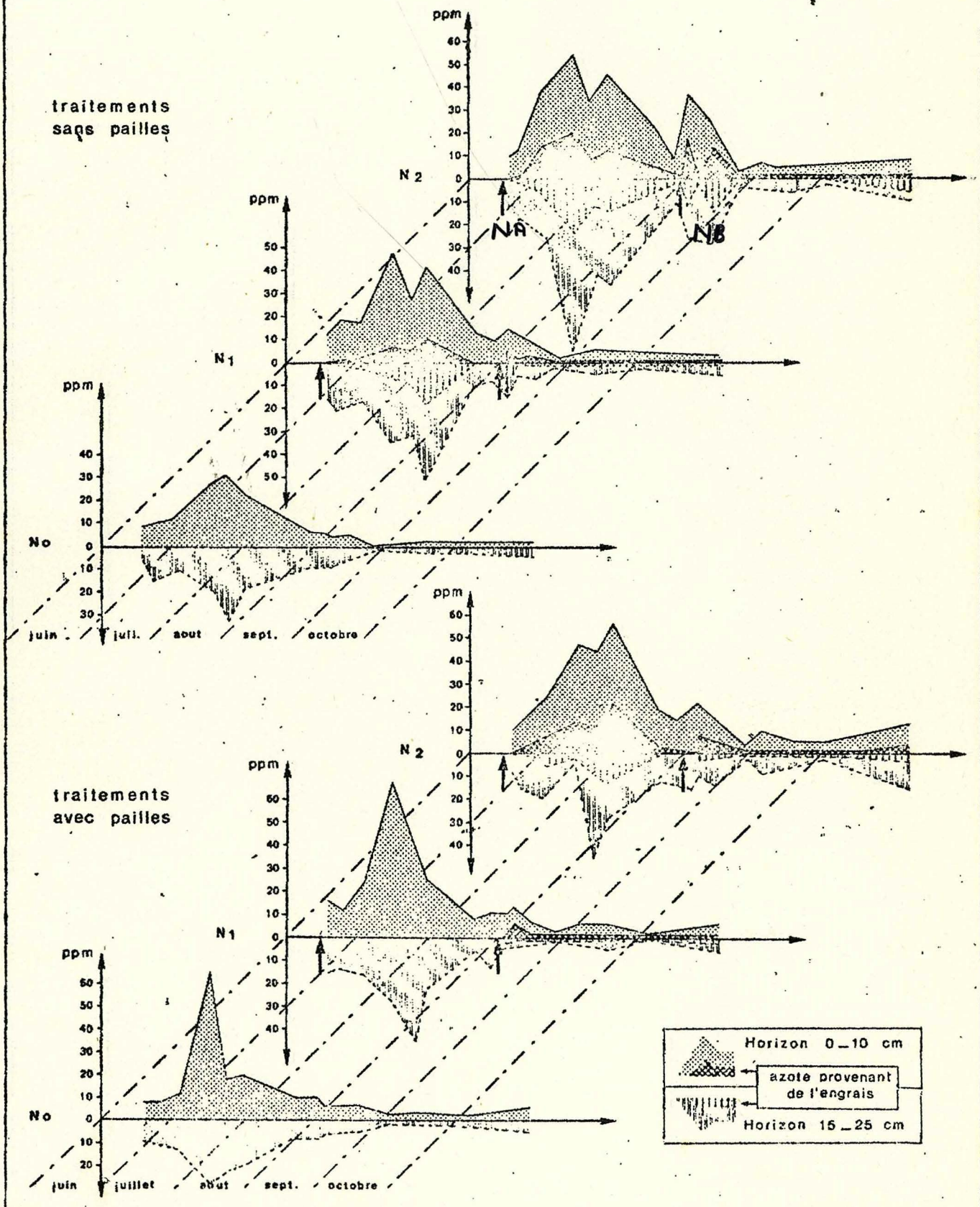
station agronomique de
BOUAKE . COTE D'IVOIRE
I.R.A.T.



JEAN MARECAU

EVOLUTION des TENEURS en AZOTE NITRIQUE du SOL
sous culture de riz pluvial

station agronomique de
BOUAKE . COTE D'IVOIRE
I.R.A.T.



JEAN MARECAU

La transformation en variables extensives, par exemple kg/ha, présente des difficultés mais peut donner un ordre de grandeur (10 ppm = 30 kg/ha dans 0-25 cm) en estimant la densité apparente du sol à 1,5 kg/dm3 et la teneur en éléments grossiers à 20 %.

a) Dynamique de l'azote minéral sous riz pluvial (1973).

1 - Aspect de la dynamique (N° 7 et 8).

1ère Flèche.

- Après le premier apport d'azote sous forme d'urée (NA sur le graphique) au moment du semis dans l'horizon 0-10 cm, on mesure une forte teneur en NH4, dont plus de la moitié provient de l'engrais. Elle diminue en quelques jours. Ce pic n'apparait pas dans la couche 15-25 cm.

A cet instant, il y a peu de nitrate et pas de nitrate marqué (N-15) provenant de l'engrais. Les nitrates n'apparaissent qu'une dizaine de jours plus tard, de façon identique dans toute la couche travaillée (0-25 cm).

- Puis, pendant plus de 2 mois, l'azote ammoniacal marqué (N-15) provenant de l'engrais est présent en faible quantité (5 ppm pour N2 et moins pour N1) dans l'horizon labouré jusqu'au 20 Août. L'azote nitrique marqué N-15 augmente jusqu'à la mi-Juillet puis disparait pendant le mois d'Août. En Juillet, le riz a son développement stoppé.
- Vers la fin Août, il n'y a que très peu d'azote minéral total dans le sol et plus d'azote minéral provenant de l'engrais. Cette période correspond au maximum de la demande instantanée de la culture en place. Le riz en effet reprend une phase active de développement et est au stade début montaison vers fin Août.
- Le deuxième apport d'azote réalisé fin Août, fait apparaître une augmentation d'azote minéral très passagère.

L'azote ammoniacal marqué (N-15) n'est repérable que dans l'horizon 0-10 cm. L'azote nitrique marqué apparait assez rapidement et est présent pendant 1 mois environ.

Les quantités présentes sont beaucoup plus faibles qu'après le premier apport. La paille enfouie semble avoir un rôle inhibiteur sur la nitrification de l'azote ammoniacal. La disparition rapide du stock d'azote minéral marqué (N-15) est expliquée par une absorption très rapide de cet azote par la plante. Cette absorption semble être faite surtout sous forme d'azote ammoniacal.

- En fin de culture, on remarque une légère augmentation des quantités d'azote minéral et une réapparition de l'azote marqué en provenance de l'engrais.

Ceci est certainement en rapport avec la rapide diminution des quantités de l'azote présentes dans la culture en fin cycle. L'azote de la plante pourrait retourner partiellement dans le sol sous forme minérale par des phénomènes d'excrétion au niveau rhizosphérique.

2 - Remarques sur la dynamique.

- Dynamique de $N-NH4^+$ (8).

Sur les traitements non fertilisés en N, les quantités présentes sont faibles et constantes.

L'apport d'engrais a un effet net et fugace. L'augmentation de la quantité de N-NH4 est sensible dans l'horizon profond mais peu importante.

- Dynamique de $N-NO3^-$ (7).

Les teneurs sont fluctuantes mais assez homogènes dans le sol exploité par les racines. Il apparait plusieurs périodes nettement différenciables :

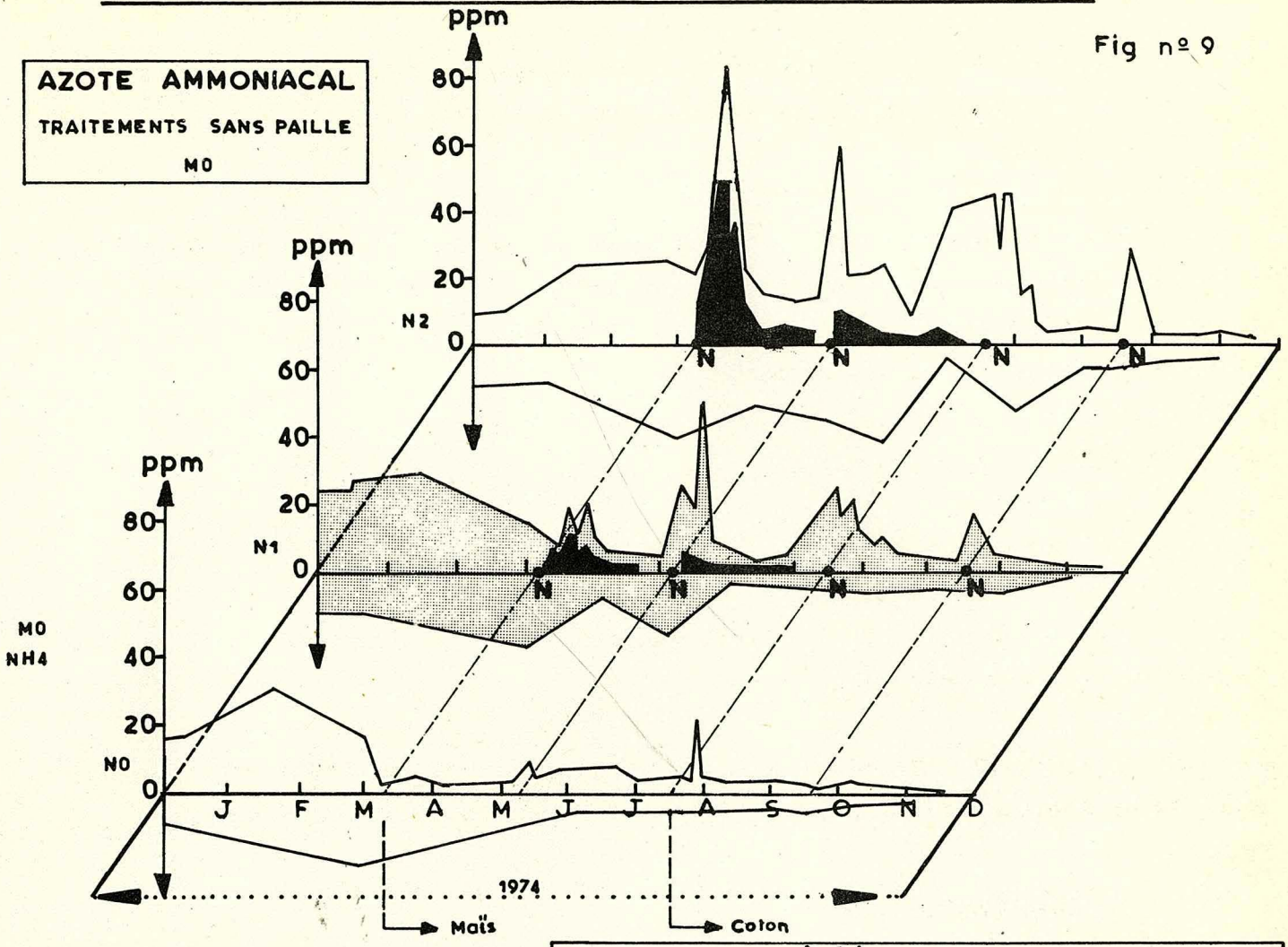
- un premier cycle de nitrification - lixiviation de Février à Mai, avant la culture du riz. Maximum de teneur dans le sol vers fin Mars. Minimum de teneur vers fin Mai. Fin Mai, on observe une période intense de lixiviation des nitrates qu'on retrouve alors dans les percolats des cuves lysimétriques installées dans les allées de cet essai. Tous les nitrates sont alors lixiviés des horizons supérieurs.
- un deuxième cycle de Juillet à fin Août. Au début de la culture, il apparait également un maximum de teneur en $N-NO3^-$ dans les percolats lysimétriques vers fin Août. Les nitrates qui se sont reformés dans cette couche sont donc à nouveau lixiviés.

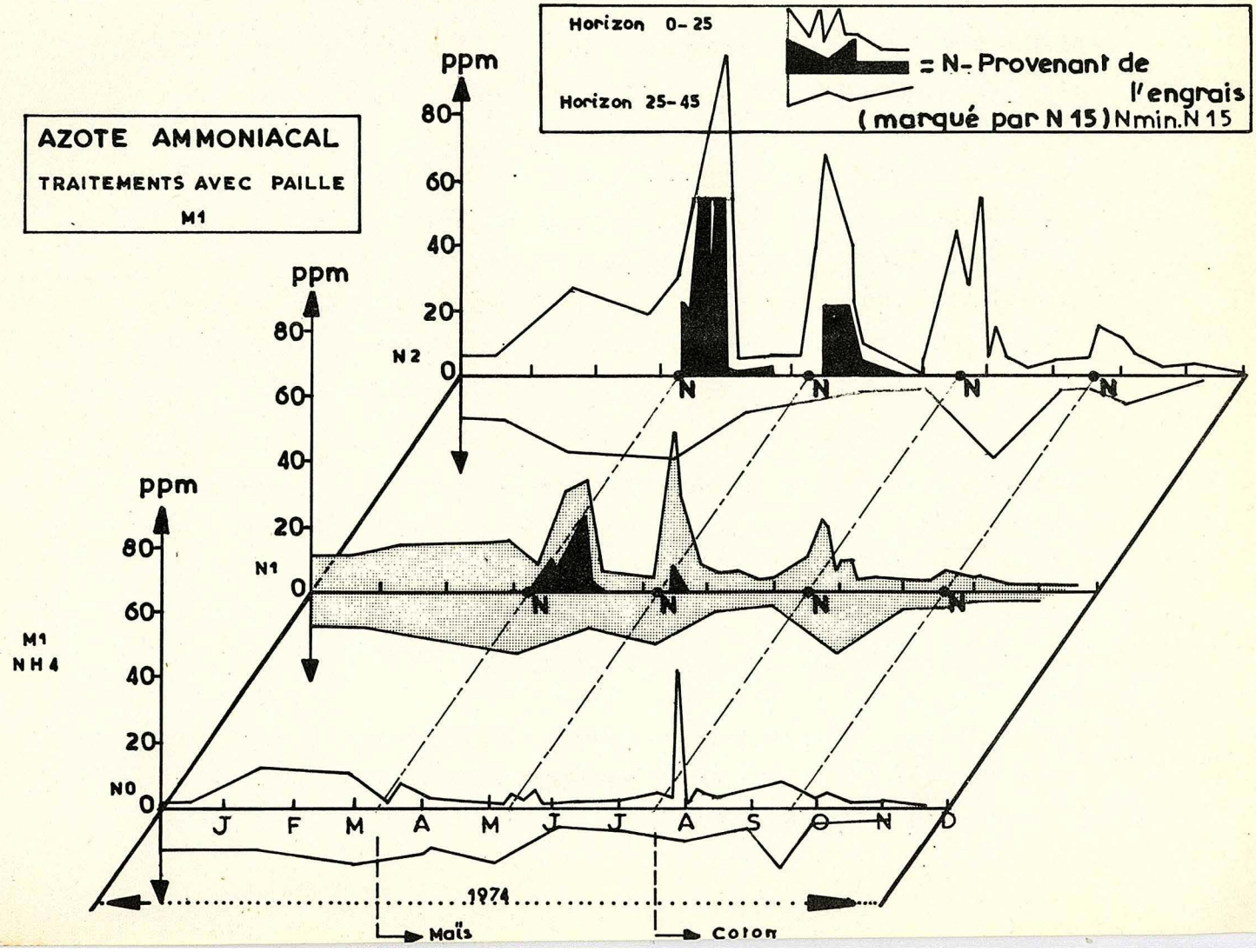
- Différence de concentration de N-engrais dans les 3 horizons étudiés.

- les quantités de N-NH4 sont toujours plus importantes dans l'horizon superficiel - l'ammonium migre lentement et partiellement dans l'horizon inférieur à 25 cm.

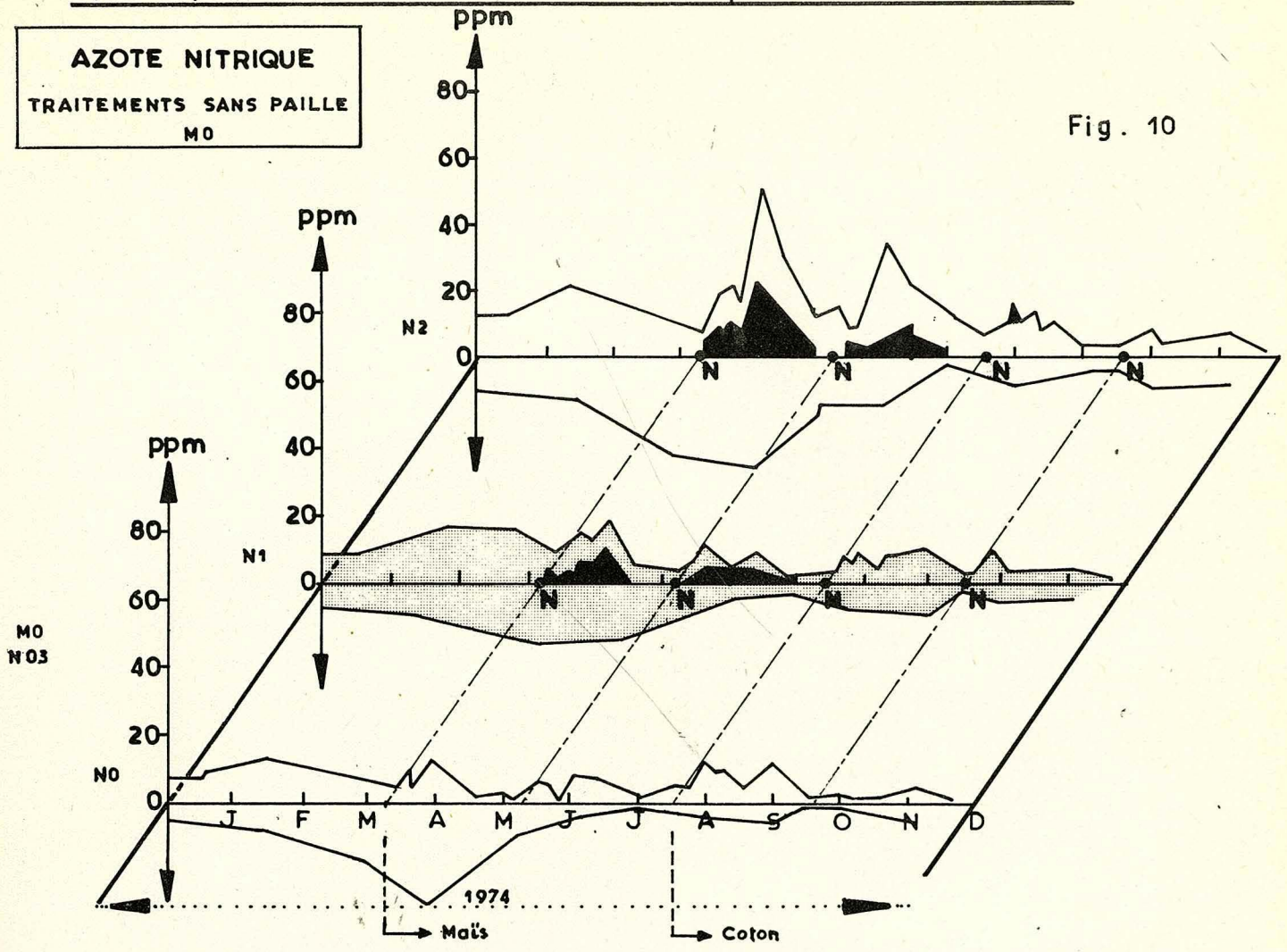
Dynamique de l'azote sous culture maïs / coton Bouaké 1974

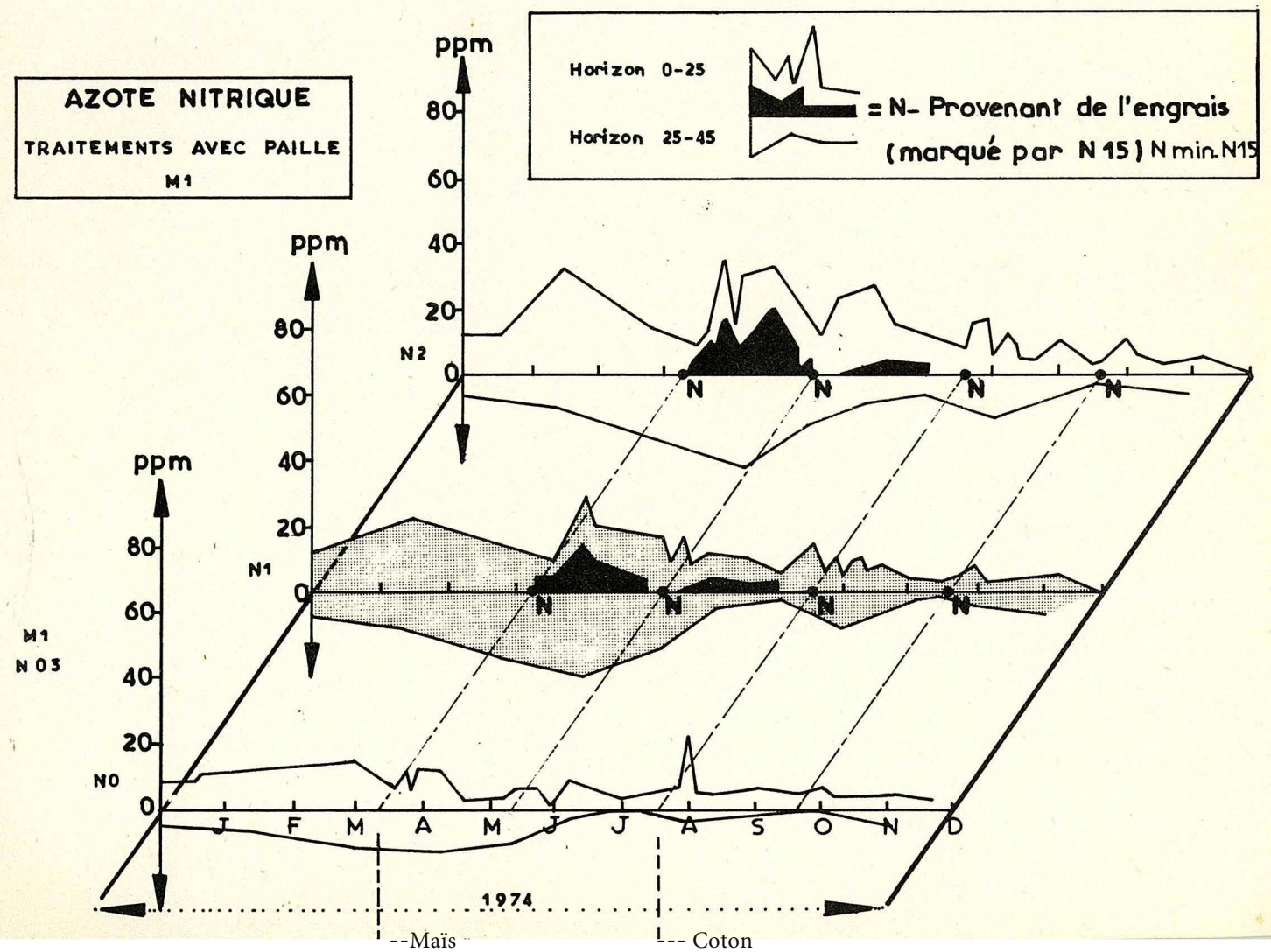
Fig n° 9





Dynamique de l'azote sous culture maïs / coton Bouaké 1974





- les nitrates une fois formés migrent rapidement à travers le sol. Les deux horizons 0-10 et 15-25 présentent des comportements semblables. Lors de pluies importantes les nitrates sont lixiviés et sont éliminés du profil superficiel vers la profondeur. On voit cette lixiviation de l'horizon 0-25 vers celui 25-45 cm.

- Alimentation du riz.

Il ressort de l'étude de la dynamique de l'azote que le riz utilise préférentiellement l'azote ammoniacal :

Sous la culture de riz, il n'apparait pas de fortes quantités d'azote minéral ammoniacal comme sous d'autres cultures. L'effet des quantités d'engrais apportées est très visible.

On peut en déduire que cette absorption préférentielle de l'azote ammoniacal doit éviter certaines pertes possibles de l'engrais.

b) Dynamique de l'azote minéral sous maïs et coton (1974) N° 9 et 10.

1 - Aspect de la dynamique.

En début d'année la minéralisation est importante dès les premières pluies ; l'arrière-action de la culture du riz joue un rôle certain dans ce phénomène, car l'immobilisation par la culture ayant été faible, un stock d'azote facilement minéralisable est resté dans le sol.

Cette première minéralisation profite peu à la culture de maïs car les nitrates formés sont lixiviés en Avril et Mai.

L'apport d'engrais sous forme d'urée au semis du maïs en Avril fait apparaître des pics importants d'azote ammoniacal. En 10 jours, l'engrais apporté se trouve sous forme ammoniacale dans le sol. Cet azote se transforme alors en partie en azote nitrique et ces deux formes sont presque entièrement utilisées après 60 jours. Les 45 premiers jours correspondent à une intense absorption de l'azote par la plante, qui est visible sur les courbes de mobilisation du maïs.

Le deuxième apport d'azote en Juin fait apparaître des pics peu marqués de l'azote engrais et les quantités d'azote présentes sont moins importantes qu'au premier épandage. Les quantités d'azote minéral et surtout d'azote-engrais disparaissent assez rapidement.

Sous la culture de coton, la dynamique est très semblable, mais les quantités présentes sont beaucoup plus faibles, aussi bien pour l'azote ammoniacal que pour l'azote nitrique.

Sur les parcelles non fertilisées les quantités d'azote présentes sont toujours excessivement faibles dans les 2 horizons étudiés. Le travail du sol avant chaque culture semble favoriser une légère minéralisation car on trouve toujours un pic sur le traitement témoin après les périodes de travail du sol.

L'horizon 25-45 semble participer à l'alimentation azotée de la culture après une période d'environ 35 jours après le semis.

2 - Remarque sur la dynamique.

- Dynamique de N-NH4.

Sur les traitements non fertilisés en N, les quantités présentes sont faibles.

L'azote ammoniacal apparait en très fortes quantités au moment des épandages d'urée et reste une trentaine de jours. Il réapparait en fin de culture de maïs, avant l'épandage d'engrais sur coton, après les premières pluies qui succèdent à la petite saison sèche.

- Dynamique de N-NO3.

Les teneurs sont nettement augmentées par la fumure, surtout sur le traitement N2.

Il apparait plusieurs périodes nettement différenciables d'augmentation puis de baisse de teneur :

- Un premier cycle nitrification - lixiviation avant la culture du maïs avec un maximum en Février. L'azote minéralisé est lixivié.
- les cycles suivants apparaissent à la suite des différents épandages d'engrais. Le plus marqué a lieu pour le premier épandage en Avril au semis. La période de lixiviation intense est Septembre.

A partir de cette date, les teneurs en N nitrique sont faibles sur tous les traitements et le dernier épandage d'azote sur coton ne marque pas beaucoup le stock d'azote nitrique.

- Alimentation du maïs et du coton.

Le premier apport d'azote est beaucoup moins intensément utilisé par le maïs si on se réfère aux courbes.

Pendant le premier mois de la culture, très peu d'azote doit être absorbé, puisqu'on trouve de grosses quantités d'azote-engrais sous forme ammoniacale puis nitrique.

L'absorption semble être très efficace à partir du 30ème jour, date à partir de laquelle elle se fait surtout à partir de la forme nitrique. A 60 jours, il reste peu d'azote minéral et peu d'azote-engrais.

Le deuxième apport semble être utilisé plus rapidement, aussi bien sous forme ammoniacale que nitrique.

A la fin de la culture, il reste encore de l'azote-engrais dans le pool d'azote minéral, surtout sous forme nitrique.

L'alimentation du coton ressemble à celle du maïs, mais cette culture semble puiser davatage dans le stock d'azote minéral qui reste constamment faible sous cette 2ème culture. La demande est donc très forte par rapport aux disponibilités.

CONCLUSION :

L'intensité des phénomènes de minéralisation n'est pas la même d'une année sur l'autre et avec des cultures différentes.

Après la phase de stérilisation partielle due à la saison sèche qui ralentit ou arrête les phénomènes microbiens, ceux-ci sont stimulés dès les premières pluies, ce qui entraine une minéralisation de l'azote. Dans le type de sol concerné, ce phénomène est intense.

Les apports d'engrais azotés ont une action très importante sur la teneur en azote minéral du sol. Cette action est très nette pour les apports réalisés au semis. Une part importante de l'engrais reste disponible dans le sol pendant 2 mois et plus jusqu'à ce que la demande par la plante soit élevée, le deuxième apport réalisé en couverture présente un effet plus fugace car il est rapidement absorbé par la culture qui a alors de gros besoins azotés. Sous riz, la forme ammoniacale est peu représentée par rapport à la forme nitrique. Sous maïs les formes ammoniacales et nitriques sont équilibrées.

Ceci nous amène à penser que le riz pluvial absorbe préférentiellement l'azote ammoniacal.

Les intensités maxima de teneurs en azote minéral s'observent sous maïs, ou on enregistre des pics de N- ammoniacal de plus de 80 ppm soit pratiquemment 140 unités d'azote minéralisant à la suite d'un apport de 100 unités d'engrais.

Ces fortes intensités ne persistent pas. La forme ammoniacale est transformée en forme nitrique qui est en partie lixiviée dans l'horizon 25-45 cm puis dans l'horizon inférieur.

Les enfouissements de pailles de maïs et riz qui présentent un rapport C/N élevé (40 à 60) n'ont pas d'effet marquant sur cette dynamique. On n'observe pas de blocage de la forme minérale de l'azote par réorganisation intensive par voie microbienne. Si ce phénomène existe, il doit être très localisé au contact du sol et de la paille enfouie au fond des sillons. Cependant, on note une tendance à une légère diminution de la forme ammoniacale et à l'augmentation de la forme nitrique.

Les arrières-effets des fumures apparaissent légèrement lors des premières minéralisations mais ce surplus d'azote est en général lixivié avant la mise en place de la culture et n'est pas utilisé par celle-ci.

Dans un soucis d'efficacité de la fumure azotée il parait préférable d'apporter l'azote lorsque les teneurs en azote minéral du sol sont faibles et que la demande instantanée de la plante est élevée. Ces périodes correspondent à peu près à la période de floraison de la culture en place. Le sol représente cependant un volant qui permet de stocker cet engrais et de le distribuer à la plante en fonction de ses besoins. Mais ce stockage temporaire d'azote entraine des pertes lors des transformations de l'azote qu'il est inutile de favoriser par des applications trop importantes et trop précoces de l'engrais azoté.

3.1.2. Cinétique de la minéralisation.

Il s'agit de tests de minéralisation de l'azote en conditions contrôlées pendant des temps courts.

Une minéralisation en milieu contrôlé pendant un temps court est un test commode pour caractériser l'aspect de la minéralisation d'un sol et définir ainsi certaines données comme les paramètres de cinétique. Dans une première approche nous avons voulu comparer les deux types de sols étudiés et voir si les traitements agronomiques que l'on a appliqués au champ à ces sols avaient une influence sur la minéralisation de l'azote du sol. L'explication de certaines différences peut être trouvée par le rôle du pH sur la minéralisation.

De la même façon nous avons testé ensuite dans ces types de sol, l'apport de différents engrais azotés.

A - Nitrification de l'azote du sol.

Une première série de tests de minéralisation a été effectuée sur des sols sans apport d'engrais azoté.

Matériel et méthode.

Les sols utilisés proviennent de prélèvements effectués sur les parcelles des traitements des essais considérés de Bouaké et de Gagnoa. Ces sols sont séchés, tamisés et disposés dans des petits pots contenant 100 g.

Les échantillons sont humidifiés à une teneur en eau déterminée en fonction de leur capacité de rétention et placés dans une enceinte maintenant une température de 30° (± 3°).

Le nombre de pots est suffisant pour permettre de suivre l'évolution des teneurs en azote minéral par des prélèvements réguliers pendant 7 à 12 jours avec plusieurs répétitions par traitement (2 ou 3 selon les séries). Sur chaque échantillon, l'humidité est contrôlée. L'azote minéral est extrait par une solution de KCl normale. L'ammonium est dosé par la méthode du phénate alcalin (CHARLOT-1966) le nitrate est réduit en nitrite qui est dosé en utilisant la réaction de Griess.

a) Comparaison des minéralisations dans les 2 types de sol Bouaké et Gagnoa.

Nous avons choisi le sol de parcelles d'essais correspondant à des traitements semblables du point de vue de la fertilisation azotée et ayant subi ces traitements un certain nombre d'années. Nous avons choisi un niveau de fumure assez élevé, sans apport de matière organique. Il s'agit du traitement MoN2 de l'essai azote-paille de Bouaké et du traitement MoN4 de l'essai azote-compost de Gagnoa.

La teneur en azote est voisine dans les 2 sols (1,0 ‰). Le rapport C/N est de 10 à Gagnoa et 13 à Bouaké. Le pH des deux sols est voisin de 5.

Le sol a été maintenu à une humidité de 12 % correspondant à un pF de 2,8 à 3. La durée d'incubation a été de 12 jours qui permet de maintenir les échantillons à l'humidité voulue sans problème.

Résultats expérimentaux : (Fig. 11 et 12)

Dans les deux cas, les points trouvés donnent des courbes d'allures sigmoïdales qui sont classiques pour ce genre de test.

Pour Gagnoa, les teneurs en N-NH4, augmentent légèrement pendant les cinq premiers jours puis diminuent progressivement jusqu'à une valeur inférieure à la valeur initiale, mais encore importante.

* Pour Bouaké, le phénomène est le même mais la période d'augmentation est plus courte et n'excède pas deux jours. La décroissance est rapide et la courbe obtenue est une sigmoïde classique tendant rapidement vers une valeur faible asymptotique.

La première période d'augmentation correspond a une phase de développement rapide de la microflore faisant suite à la réhumectation du sol et la période de décroissance correspond à l'oxydation de N-NH4 en N-NO3.

- Les teneurs en N-NO3 évoluent correlativement à celles de N-NH4 :

* Pour Gagnoa, évolution lente pendant 5 jours puis augmentation plus rapide.

* Pour Bouaké, évolution rapide tendant vers une valeur maximum asymptotique.

* Pour simplifier les représentations et comparer ces résultats on peut considérer les parties principales de ces courbes comme des droites de façon à pouvoir déterminer les paramètres des cinétiques par regression linéaire sur les points expérimentaux.

Les droites trouvées sont :

Bouaké	Gagnoa
C-NH4 = 8.7 - 0,436 t (r = 0.70)	C-NH4 = 7.62 - 0.07 t (r = 0.62)
C-NO3 = 11.0 + 0,755 t (r = 0.92)	C-NO3 = 23.6 + 0.49 t (r = 0.88)

* t représente le temps en jours

* les concentrations en azote C-NH4 et C-NO3 sont données en ppm (mg/kg) d'azote par rapport au sol sec.

Discussion des résultats.

On observe les deux faits suivants :

- Aux conditions initiales, la teneur en N-NO3 est plus importante à Gagnoa.
- Les vitesses de transformation de Bouaké sont nettement plus rapides que celles de Gagnoa : dans le sol de Bouaké, la minéralisation de l'azote initial du sol est pratiquement terminée au bout de 12 jours alors que dans le sol de Gagnoa, elle est juste commencée.

Des paramètres des droites, on peut déduire la vitesse théorique de production de N-NH4 à partir de l'azote organique du sol en calculant la différence des pentes des deux droites de C-NO3 et C-NH4, soit la vitesse d'ammonisation vA :

vA = Bouaké : 0.755 - 0.436 = 0.319 ppm/jour

vA = Gagnoa : 0.49 - 0,070 = 0.420 ppm/jour

Les processus d'Ammonisation du sol de Gagnoa serait donc plus important que celui de Bouaké.

Les différences essentielles entre ces deux sols sont :

*L'Ammonisation est importante à Gagnoa mais la minéralisation globale est lente. Les teneurs en N-NH4 varient peu sur des temps courts d'incubation, alors qu'au contraire les teneurs en N-NH4 dans le sol de Bouaké tendent rapidement vers une valeur asymptotique faible.

* Correlativement à l'évolution de N-NH4, celle de N-NO3 montre une évolution rapide vers une valeur asymptotique à Bouaké, alors qu'à Gagnoa cette valeur n'est pas atteinte pour le temps d'incubation choisi.

Ces observations peuvent être expliquées de diverses façons.

1ère hypothèse.

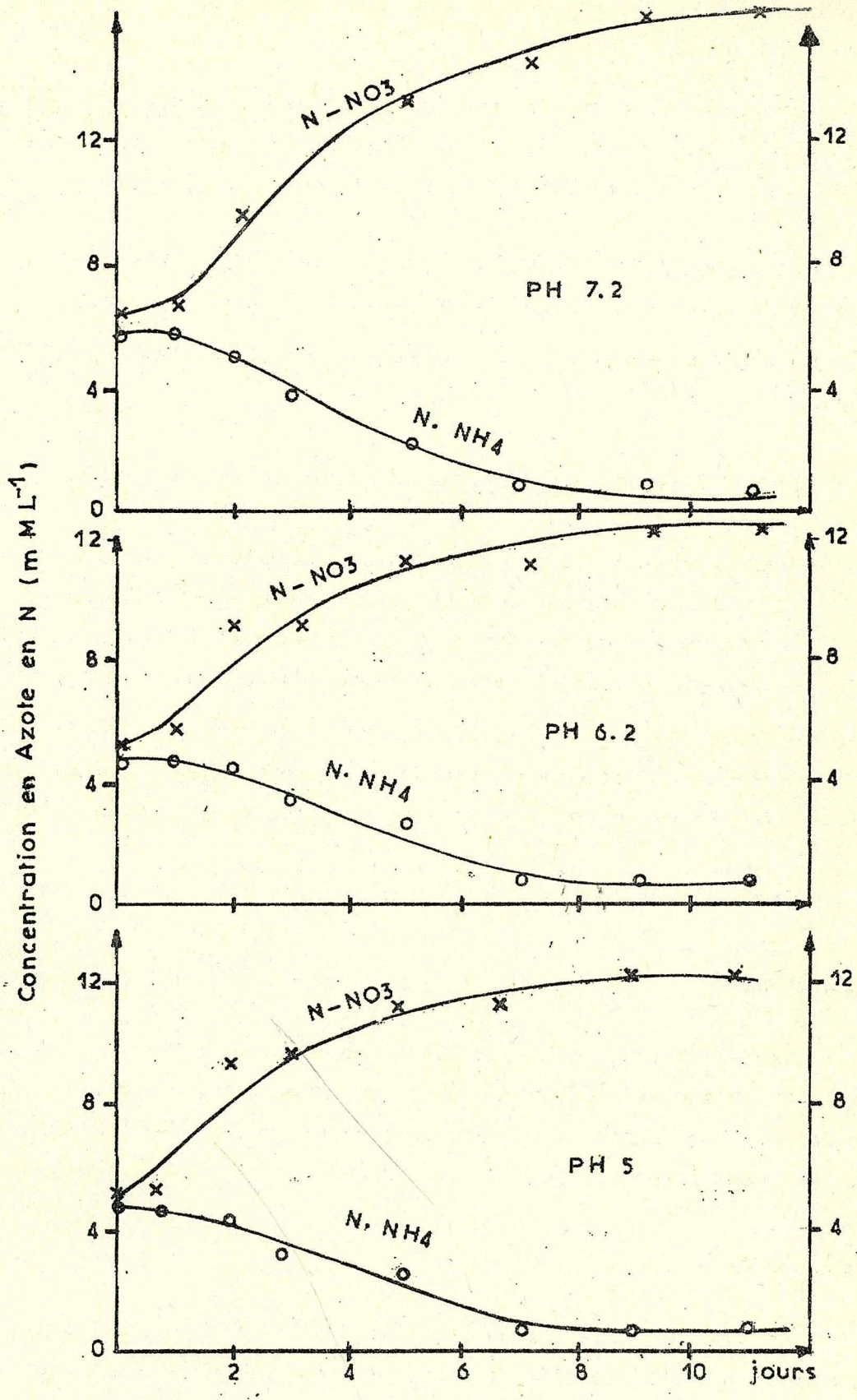
Les différences sont dues à des conditions différentes du sol (propriétés physiques et chimiques) pendant le test de minéralisation. La flore active est semblable mais, par exemple, l'aération d'un sol peut être meilleure que celle de l'autre sol dans les conditions de l'expérience.

2ème hypothèse.

Le type de flore active dans ces 2 sols est assez différent, comme le font penser les tests microbiologiques réalisés par PERRAUD qui sont résumés en première partie.

+ à Bouaké, la flore permet une minéralisation rapide par rapport à l'ammonification. Elle serait donc riche en bacteries des genres Nitrobacter et Nitrosomonas.

+ à Gagnoa, l'ammonisation est plus rapide que la minéralisation. La flore serait plus riche en microorganiques divers (champignons et bacteries) qu'en bacteries nitrifiantes.



Evolution expérimentale à 30° des teneurs en ammonium et en nitrates dans les sols de Bouaké prélevés sur l'essai "azote x paille"

sol pH 5 — sol pH 6.2 — sol chaulé à pH 7.2

m M L = milli Mole par Litre de solution du sol

Fig. n° 11

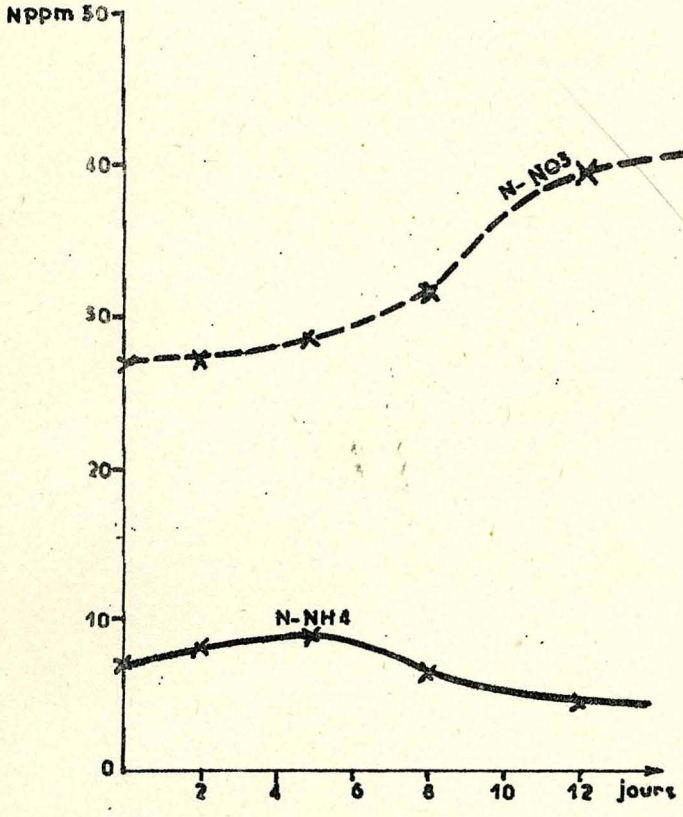
Minéralisation de l'azote du sol : influence des traitements agronomiques du champ

sol de l'essai "azote x compost" GAGNOA

SOL PRELEVE APRES 4 ANNEES DE CULTURE ET 7 CYCLES CULTURAUX

TRAITEMENTS ANTERIEURS FAITS AU CHAMP

TRAITEMENT SANS COMPOST



TRAITEMENT AVEC COMPOST

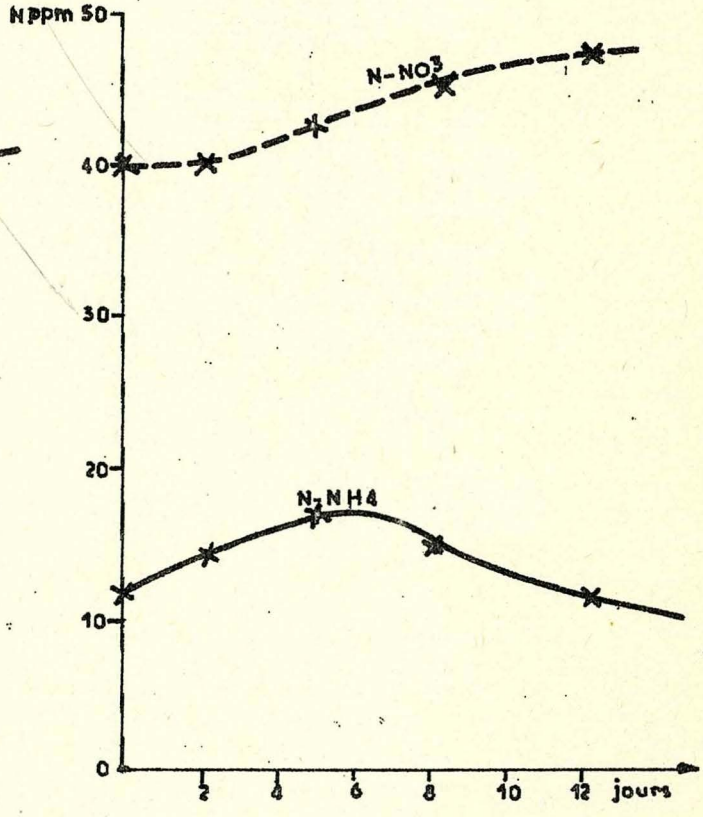


Fig n° 12

Cette hypothèse serait évidemment à vérifier par une analyse microbiologique de ces deux sols.

Comme conclusion, on retiendra de ce test que les vitesses de transformation de l'azote organique en azote minéral dans ces deux sols, qui ont évolué dans des conditions de culture intensive comparables, sont assez différentes.

b) Influence des traitements agronomiques subis au champ sur la minéralisation de l'azote du sol.

Il s'agit de savoir si un même sol subissant des traitements agronomiques différents au champ acquièrt des dynamiques de minéralisation caractéristiques des traitements subis. Deux tests ont été effectués pour cela, le premier pour juger de l'influence d'apports répétés de compost et le deuxième pour juger de l'effet d'apport de paille et d'azote engrais.

Schéma n° 12 - Le compost amené régulièrement 7 fois de suite en 4 ans au sol de Gagnoa augmente nettement les quantités d'azote minéral présentes.

L'augmentation de N total est d'environ 10 % et celle de C est du même ordre de grandeur -

Les courbes obtenues peuvent être ramenées à des droites par ajustement linéaire : (Figures 12 - 13)

Mo	Sans compost	C-NH4	y = 7.62	-	0.07 t	r =	0.62
		C-NO3	y = 23.6	+	0.49 t	r =	0.88
M1	Avec compost	C-NH4	y = 13.7	-	0.08 t	r =	0.50
		C-NO3	y = 40.0	+	0.138t	r =	0.60

Le compost augmente donc les quantités initiales d'azote minéral, surtout N-NO3. La dynamique de N-NH4 reste la même, par contre celle de N-NO3 est sensiblement modifiée. L'augmentation des teneurs est plus faible avec le compost pendant la période considérée, la nitrification est donc ralentie.

Si l'on compare les coefficients de minéralisation :

+ Pour Mo le rapport $\frac{N \text{ min.}}{N \text{ total}}$ est de : 3.7 %

+ Pour M1 il est de = 5.4 %

+ Le rapport C/N reste constant et égal à 10 dans les deux cas.

L'apport de compost a donc influencé la minéralisation de l'azote organique du sol :

- accroissement du coefficient de minéralisation, correlativement à une légère augmentation en N et C total.
- léger ralentissement de la nitrification.

Ce ralentissement peut être expliqué suivant deux hypothèses :

- modification de la microflore entrainant, une ammonisation moins importante. Ceci semble peu probable d'après l'aspect des courbes de N-NH4.

  ammonisation théorique vA sans compost = 0.420

  vA avec compost = 0.058

- modification des conditions physico-chimiques entrainant une perte par dénitrification plus importante lors de la nitratation.

  Ces pertes pourraient être dues à des réactions du type réaction de Van Slyke avec des composés aminés dont la présence serait favorisée par les apports de matière organique préhumifiée.

Schéma n° 13 - les apports de paille au sol dans les conditions de culture modifient également l'aspect de la dynamique de l'azote minéral.

Dans l'essai "paille et azote" de Bouaké, l'effet est net sur la nitrification et il l'est de façon moins marquée sur l'essai de Gagnoa qui est plus récent et dont des sols ont été moins longtemps soumis aux traitements agronomiques.

- Pas d'augmentation significative en N total et en C total
- Pas d'augmentation significative des teneurs initiales en azote minéral, mais modifications de la dynamique dont la plus importante semble être l'augmentation de la vitesse de nitrification.

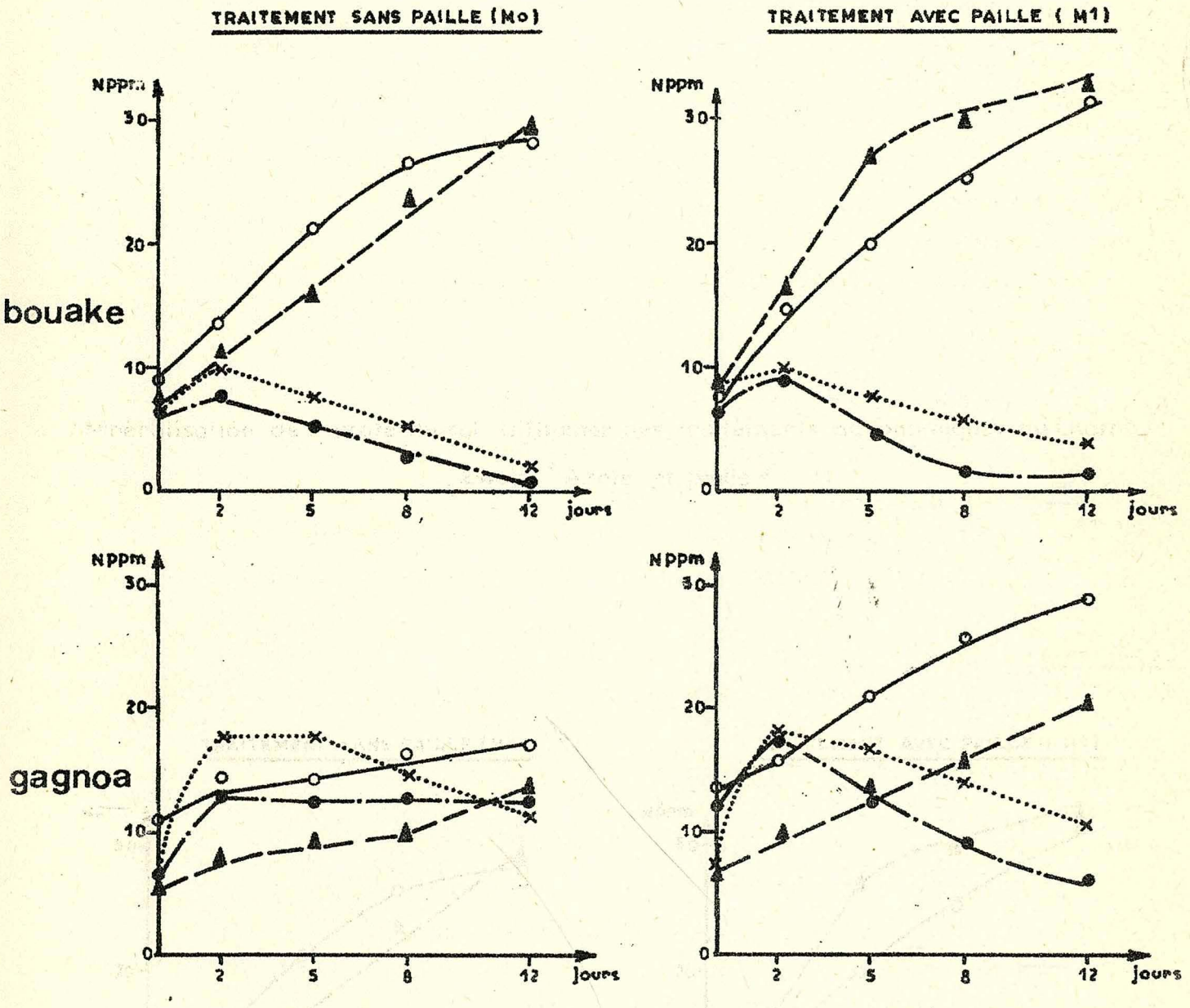
Schéma n° 13 - les apports d'engrais azotés dans le sytème de culture modifient également l'allure des courbes. Les teneurs initiales sont peu augmentées mais la dynamique est assez différente pour chaque cas.

L'engrais fait diminuer les teneurs en N-NH4 du sol et augmenter celles en N-NO3.

L'apport d'engrais azoté fait augmenter la minéralisation de l'azote du sol en améliorant la nitrification.

Minéralisation de l'azote du sol influence des traitements agronomiques au champ

Essais "Azote et paille"



	AZOTE MINERAL	
	N-NH4	N-NO3
Sans Azote engrais No	.....x.....	——▲——
Avec Azote engrais N2	—·—●—·—	——○——

Fig. nº 13

- l'apport d'engrais combiné à un apport de paille modifie de façon différente la minéralisation des deux sols étudiés.

  L'amélioration de la nitrification par les apports de paille est supérieure à celle de l'engrais. L'intéraction engrais et paille est plutôt négative à Bouaké alors qu'à Gagnoa l'intéraction est au contraire positive.

  Notons qu'à Bouaké la quantité d'azote minéral produit au bout de 12 jours d'incubation et qui est surtout du N-NO3 est approximativement la même pour tous les traitements(entre 30 et 35 ppm).

  A Gagnoa les différences sont un peu plus importantes entre les traitements.

En résumé nous dirons que les traitements agronomiques que l'on applique au champ modifient sensiblement l'aspect de la dynamique de l'azote minéral du sol pendant des temps courts :

+ le compost augmente le stock d'azote et le coefficient de minéralisation mais diminue la nitrification brute.
+ la paille augmente la vitesse de nitrification au début de la minéralisation et légèrement le stock d'azote minéral.
+ l'engrais augmente les teneurs de N-NO3 et peu celle en N minéral total.

  L'application régulière d'engrais tend à faire diminuer les teneurs en N-NH4 dans le sol de Gagnoa et à augmenter celle en N-NO3. Le phénomène est plus complexe à Bouaké car il existe une intéraction engrais et paille qui est négative à Bouaké. Ceci peut être expliqué par l'influence des engrais azotés et de la paille enfouie sur le pH.
  En effet après plusieurs années d'apport de fortes doses d'engrais azoté, le sol s'acidifie. Le sol recevant l'engrais à Bouaké est à pH5 alors que le sol témoin avec paille est à pH 6,2. A Gagnoa, l'essai étant plus récent, les pH des deux traitements sont peu différents. Il y a donc des différences assez importantes de pH entre les différents traitements testés à Bouaké et peu de différence à Gagnoa.

L'engrais et la paille peuvent donc avoir une influence directe sur la dynamique de l'azote en améliorant et modifiant le stock d'azote minéralisable et la microflore, mais aussi une action indirecte sur les caractéristiques physico-chimiques du sol et notamment sur le pH.

Nous étudierons cette influence par une expérimentation simple de minéralisation.

c) Effet du pH sur la minéralisation : (fig. 11)

Nous avons choisi trois pH pour le sol de Bouaké contenant des quantités d'azote total identiques = 1,0 %o.

- pH 5 (sol du traitement MoN2)
- pH 6,2 (sol du traitement M1No)
- pH 7,2 (sol précédent amendé par du calcaire)

Les courbes donnent l'évolution expérimentale à 30° des teneurs en N-NH4 et N-NO3 à ces trois pH.

Si on considère les parties principales de ces sigmoïdes comme des droites, nous trouvons :

pH 5 (C.NH4 = 8.7 - 0.436 t
(C.NO3 = 11.0 + 0.755 t

pH 6,2 (C.NH4 = 9.0 - 0.631 t
(C.NO3 = 10.7 + 0.855 t

pH 7,2 (C.NH4 = 10.0 - 0.639 t
(C.NO3 = 10.9 + 1.362 t

Les courbes sur le tableau sont données en mML^{-1}* de solution du sol en prenant la conversion basée sur une teneur en eau de 12 %. Cette transformation est utile pour la modélisation mathématique de la minéralisation que nous expliquerons dans un chapitre ultérieur.

On constate l'applatissement des courbes avec la baisse du pH. Les pentes de droites de regression diminuent.

Pour C.NH4 la diminution est forte entre pH 6,2 et pH 5
Pour C.NO3 la diminution est forte entre pH 7,2 et pH 6,2.

Le pH agit peu sur la nitrification de N-NH4 qui est légèrement ralentie pour des pH très acides mais il agit surtout sur la dynamique de N-NO3 = intensité et cinétique. Pour des quantités d'azote aux conditions initiales semblables, les quantités de N-NO3 présentes après 10 jours seraient théoriquement d'après les droites de regression de :

C-NO3 à pH 7,2 = 24,5 ppm
pH 6,2 = 19,2 ppm
pH 5 = 18,5 ppm

* mML^{-1} : milliMole par litre de la solution du sol.

La baisse du pH inhibe donc la minéralisation. Ceci peut s'expliquer soit par un ralentissement de l'ammonisation, soit par un mauvais rendement de la nitrification.

Plusieurs auteurs pensent toutefois que les organismes spécifiques de la nitrification sont plus sensibles à la réaction du sol que la population complexe de microbes ammonifiants. L'opinion générale est que la nitrification n'est pas possible à des pH inférieurs à 5 et que l'azote reste sous forme N-NH4 à ces pH, le taux de nitrification étant directement lié au pH. Ceci s'explique par le fait que la concentration en ion hydrogène influe sur l'oxydation de l'azote donc sur la prolifération des microorganismes autotrophes qui en dépend. Par contre il existe des populations d'hétérotrophes capables de produire du nitrite à des pH en dessous de 5,0. Ce nitrite peut être alors oxydé par une réaction non biologique (Tylerand Broadbent 1960) mais peut subir également des pertes importantes par dénitrification chimique avant sa transformation en nitrate.

En résumé nous retiendrons que dans le type de sol que l'on étudie la nitrification est encore active à des pH bas considérés comme limite inférieure à cette réaction biologique. Le taux de nitrification est cependant ralenti. Cette baisse peut être expliqué par une mauvaise oxydation du nitrite formé à partir de divers microorganismes.

B - Nitrification et devenir des engrais azotés.

Généralités.

Lorsqu'on ajoute un engrais azoté à un sol, l'engrais passe dans la solution du sol au bout d'un certain temps en fonction de sa nature et de sa forme. Il subit alors les mêmes phénomènes microbiens que l'azote en provenance du sol et est soumis au même cycle de transformation et de pertes.

On peut distinguer deux formes principales d'engrais azotés : les engrais ammoniacaux et les engrais nitriques. En zone tropicale, il est d'usage d'employer des engrais ammoniacaux plutôt que nitriques pour éviter des pertes importantes par lixiviation. Il est cependant connu que les fertilisants ammoniacaux sont à l'origine d'une acidification des sols car l'oxydation biologique de l'ion ammonium libère deux équivalents d'ion hydrogène pour 1 équivalent d'azote oxydé.

Nous avons voulu suivre le devenir de différents engrais azotés dans le sol et voir si des pertes mesurables se produisaient pendant leur minéralisation.

Matériel et Méthode.

Les sols et la méthode d'étude sont les mêmes que précédemment.

L'engrais azoté est ajouté sous forme de solution pendant l'humidification du sol. On détermine à priori une quantité d'azote à apporter au sol. On prépare alors un volume de solution de cet engrais avec une concentration permettant d'apporter la quantité voulue par des apports de 2 ou 5 cm3 de solution à la pipette de précision.

On détermine ensuite par l'analyse d'une aliquote la quantité exacte d'azote que l'on a apporté au sol.

Résultats.

a) Apport des trois formes d'azote engrais au sol de Bouaké

N-NH4 - N-NO2 et N-NO3 : (figure n° 15)

Nous avons tenté une première expérience en suivant l'évolution de l'azote minéral dans un sol de Bouaké (pH 5) auquel nous avions ajouté 10 ppm d'azote sous forme d'ammonium, de nitrite et de nitrate.

Les résultats sont donnés ci-dessous, en considérant l'évolution des teneurs en azote comme linéaire pendant la durée de l'expérience (7 jours à 30°). Les paramètres des droites de regression sont :
T = temps en jour - C = concentration de N en ppm. (mg par kg de sol sec)
(Voir tableau n°).

1 - Sol sans addition d'azote minéral :

$$CNH4 = (5.8 \pm 0.3) + (-0.79 \pm 0.07)\ T$$

$$CNO3 = (6.3 \pm 0.4) + (1.55 \pm 0.10)\ T$$

2 - Sol avec addition de 10 ppm d'azote ammoniacal (sulfate d'ammoniac) :

$$CNH4 = (16.5 \pm 0.08) + (-1.27 \pm 0.19)\ T$$

$$CNO3 = (5.8 \pm 0.2) + (2.04 \pm 0.05)\ T$$

3 - Sol avec addition de 11.3 ppm d'azote nitrique - (nitrate de Na)

$$CNH4 = (7.7 \pm 0.02) + (-0.97 \pm 0.05)\ T$$

$$CNO3 = (15.9 \pm 0.02) + (2.0 \pm 0.05)\ T$$

4 - Sol avec addition de 10 ppm d'azote nitreux - (nitrite de Na)

$$CNH4 = (10.58 \pm 0.01) + (-1.27 \pm 0.10)\ T$$

$$CNO3 = (6.0 \pm 0,08) + (1.56 \pm 0.08)\ T$$

On peut en déduire que la vitesse théorique de production de NH4 à partir de l'azote organique du sol est :

1 - Sol témoin = 0.76 ppm/j.
2 - Sol + NH4 = 0.77 ppm/j.
3 - Sol + NO2 = 0.29 ppm/j.
4 - Sol + NO3 = 1.03 ppm/j.

La teneur en nitrite du sol a été analysée également à chaque prélèvement. Celle-ci est pratiquement nulle dans tous les cas. Quelques heures après l'apport de 10 ppm de N-NO2, on ne trouve déjà plus qu'une fraction de cet azote et 1 jour après il n'y a plus que des traces de N-NO2. Il semble qu'une partie de ce N-NO2 ait été réduite en N-NH4 dès son incorporation au sol et que l'autre partie a été dénitrifiée très rapidement.

Si l'on compare les quantités d'azote minéral trouvées après 7 jours d'incubation, par rapport à la quantité théorique qu'on devrait trouver.

Expérimental	Théorique
Sol témoin = 17.4 ppm	- 17.4 ppm
	au lieu de
Sol + N-NH4 = 29.5 ppm	- 17.4 + 10 = 27.4 ppm
Sol + N-NO2 = 18.6 "	- 17.4 + 10 = 27.4 ppm
Sol + N-NO3 = 30.9 "	- 17.4 + 11.3= 28.7 "

× Le nitrite semble donc entièrement perdu par dénitrification

× Le sulfate d'ammoniac a un moins bon rendement que le nitrate. Les pertes enregistrées à partir du nitrite laissent à penser qu'elles sont dues au processus de nitrification du N-NH4 apporté au sol.

× L'apport de N-NH4 et surtout de N-NO3 stimule légèrement la minéralisation de l'azote du sol.

b) Apport de N-NH4 dans un sol de Gagnoa (figure n° 14)

50 ppm de N-NH4 sous forme de sulfate ont été ajoutés aux deux sols de l'essai "compost-azote" des traitements MoN4 et M1N4 déjà étudiés.

On constate que cet apport affecte les teneurs en N-NH4 mais ne modifie pas les vitesses de nitrification qui restent très lentes.

Il n'y a pas comme dans le sol de Bouaké un effet stimulant de l'apport qui augmente la quantité d'azote minéral du sol et les vitesses de transformation de l'azote.

c) Effet du pH sur la minéralisation de l'azote avec apport d'engrais (fig.n° 16)

On reprend les sols de Bouaké à 2 pH très différents pH 7,2 et pH 5 pour savoir si l'acidification d'un sol entraine des perturbations importantes sur la minéralisation de l'azote-engrais.

On ajoute au sol environ 45 ppm d'azote sous forme d'urée, de sulfate d'ammoniac et de nitrate de sodium.

Les résultats sont présentés par les graphiques et de tableau n° 16 et 16 bis. Il en ressort que

- l'urée est transformée en N-NH4 moins rapidement à pH acide - l'uréase est moins active à pH acide.
- l'urée agit de la même façon que le sulfate d'ammoniac après sa transformation en N-NH4.

d) Dynamique d'engrais marqué dans le sol de Bouaké. (Figure n° 17).

Un essai du même type a été fait sur du sol de Bouaké à pH 5 et pH 7,2 avec de l'engrais sous forme de sulfate d'ammonium marqué par 30 % de N-15.

Le test a consisté à ajouter au sol 50 ppm d'azote et à suivre l'azote marqué dans le pool d'azote minéral et l'azote total du sol.

L'humidité du sol était de 15 % pendant l'incubation. Les résultats sont consignés dans le graphique n° 17.

Minéralisation de l'azote engrais dans un sol de GAGNOA

essai "azote - compost"

TRAITEMENTS AU CHAMP

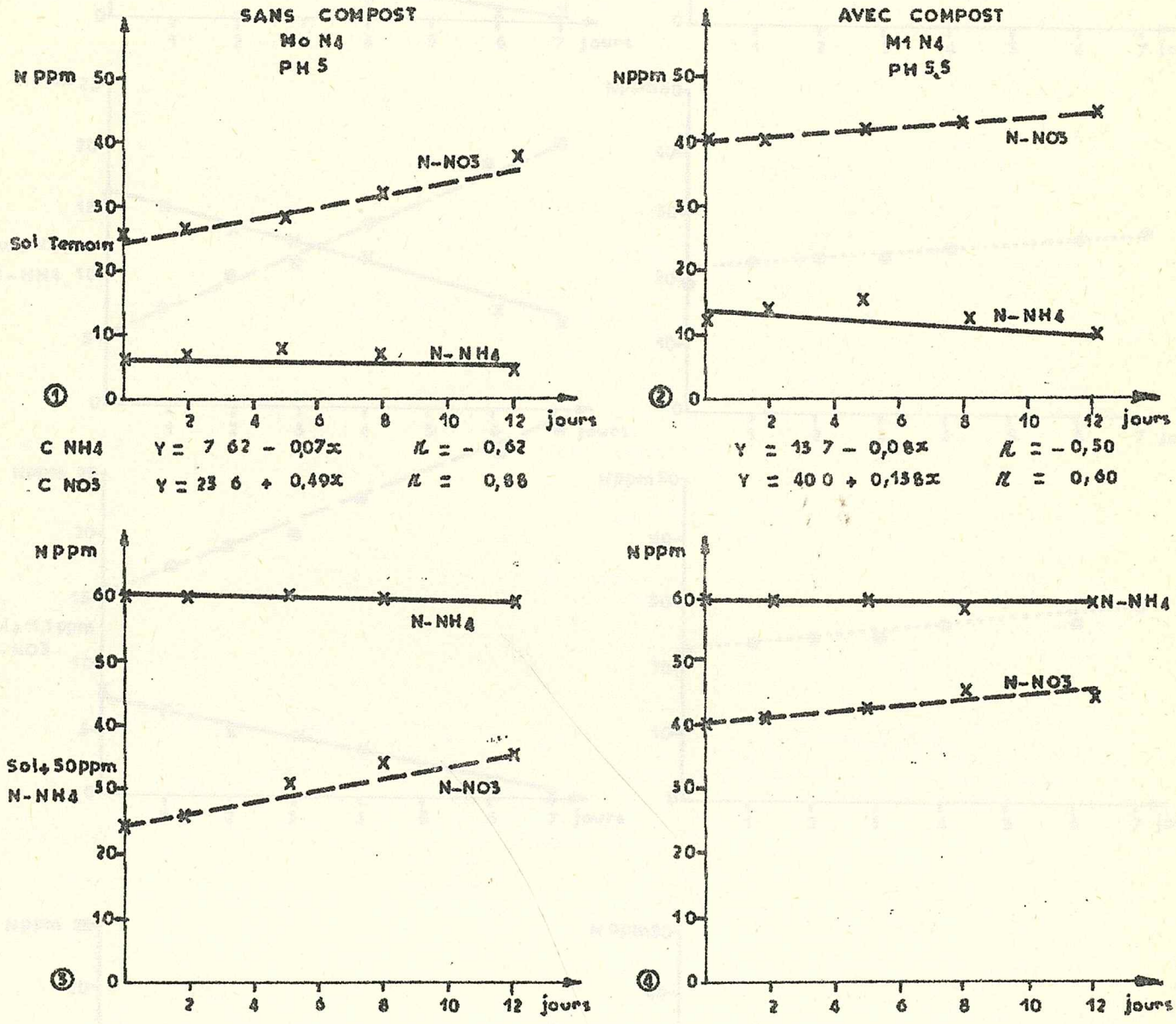


Fig. n° 14

Expérience préliminaire de minéralisation : sol de BOUAKE (PH 5) - 1973

Apport de trois formes d'engrais azote au sol

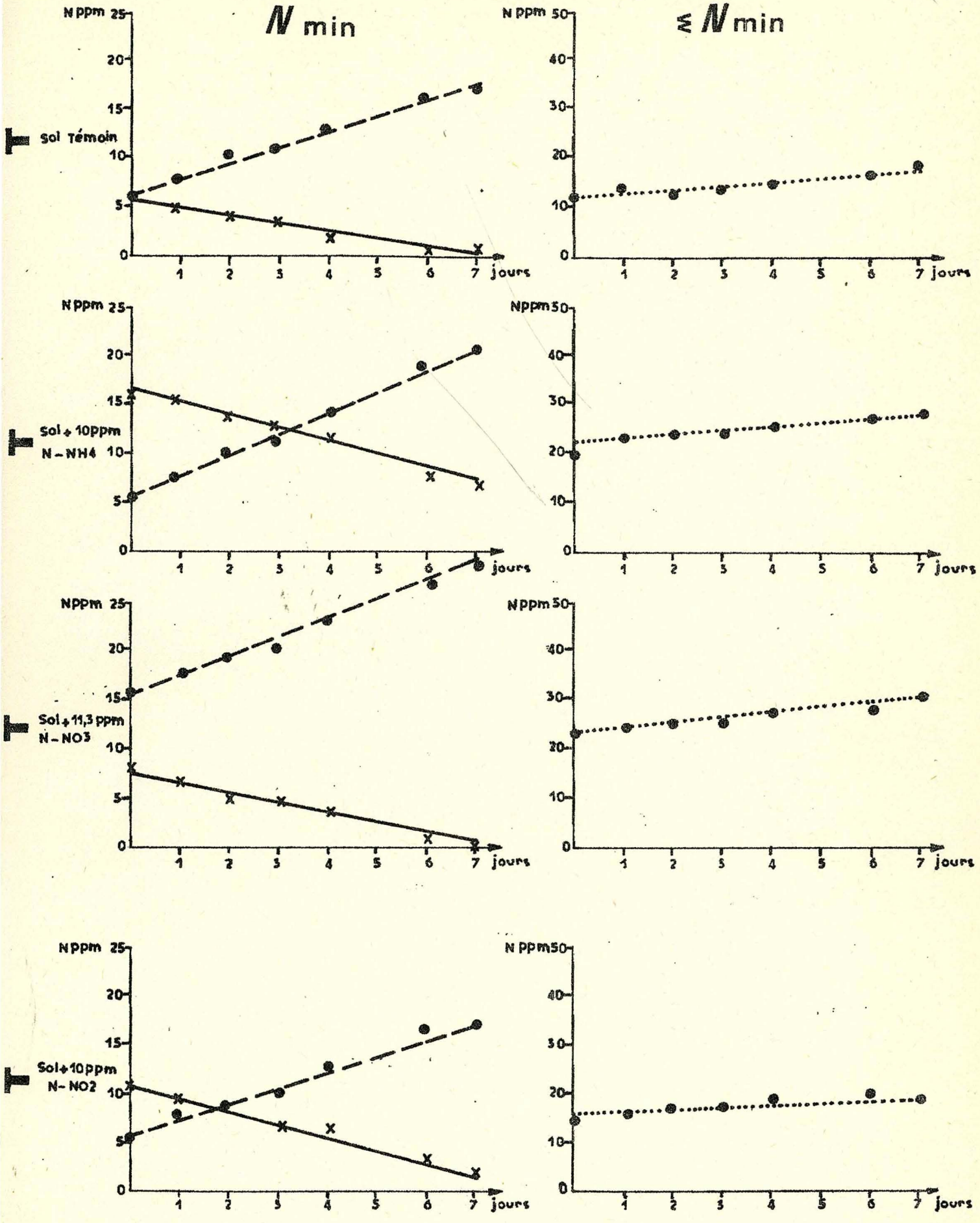


Fig. n° 15

Minéralisation de l'azote engrais : effet du PH dans un sol de BOUAKE

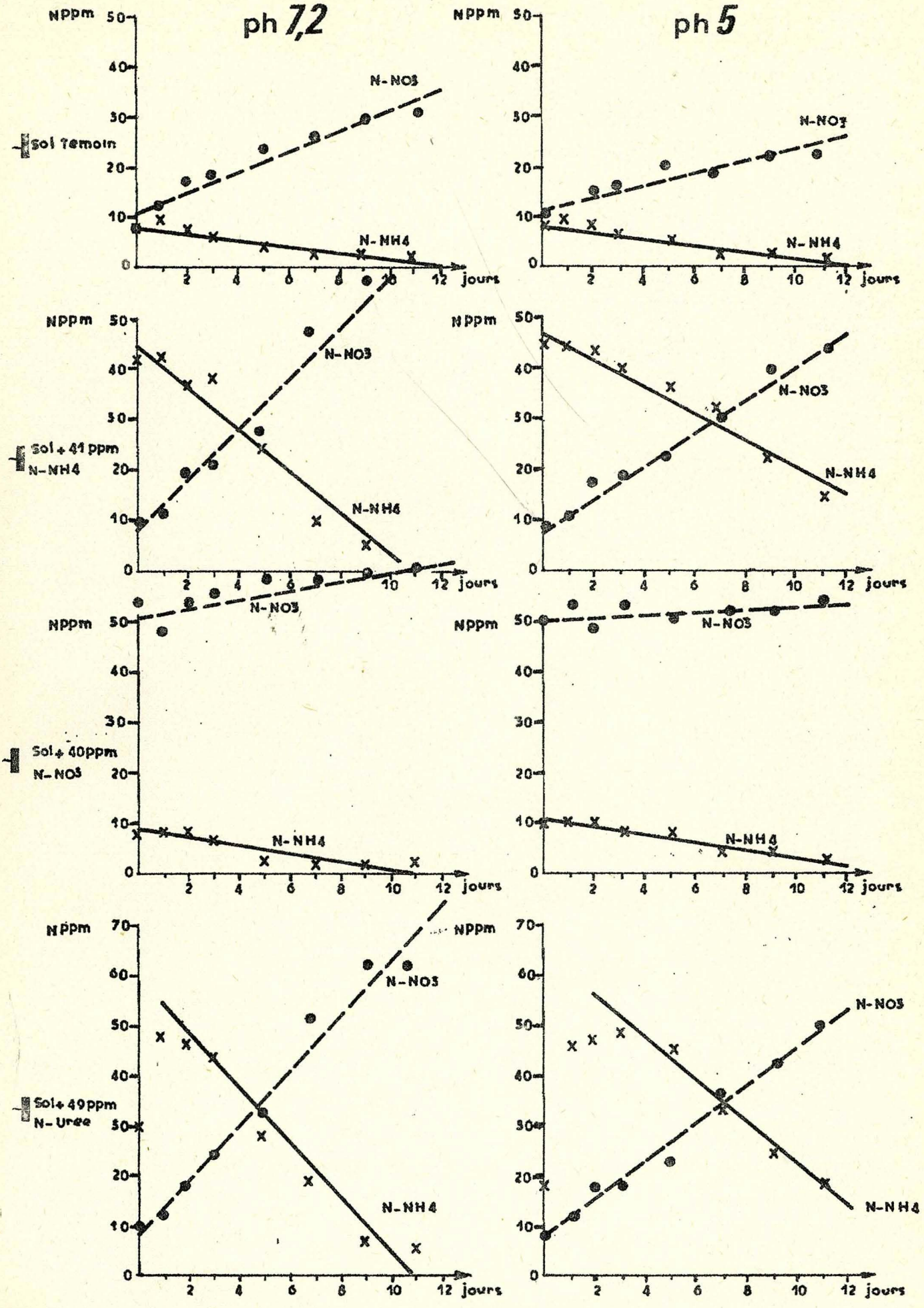


Figure n° 16

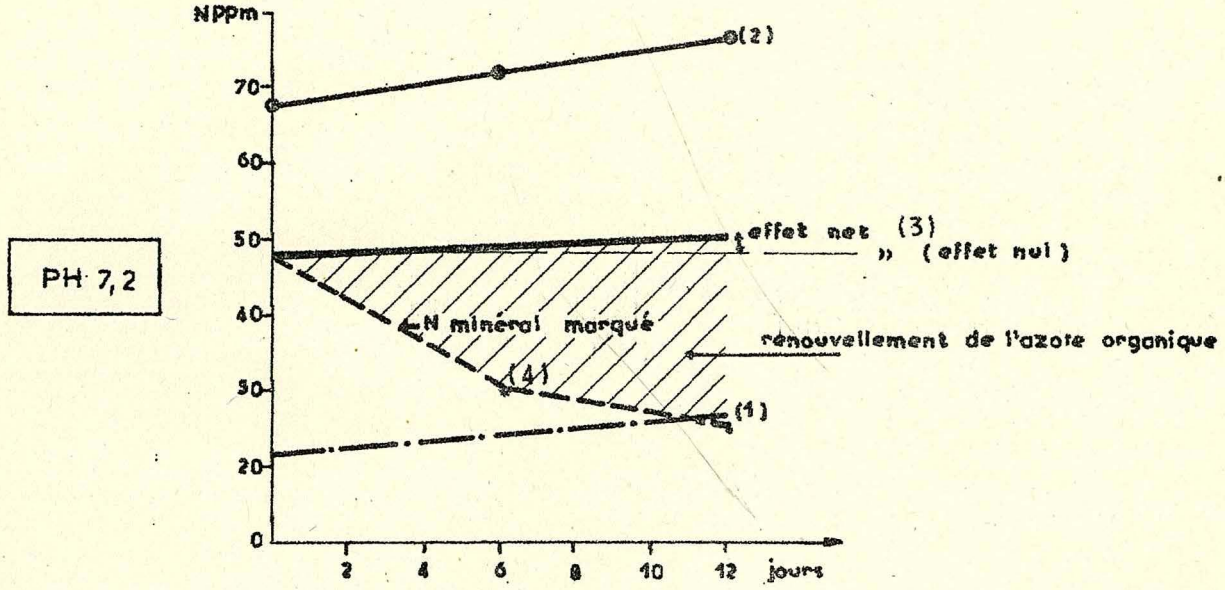
Droites d'ajustement calculées.

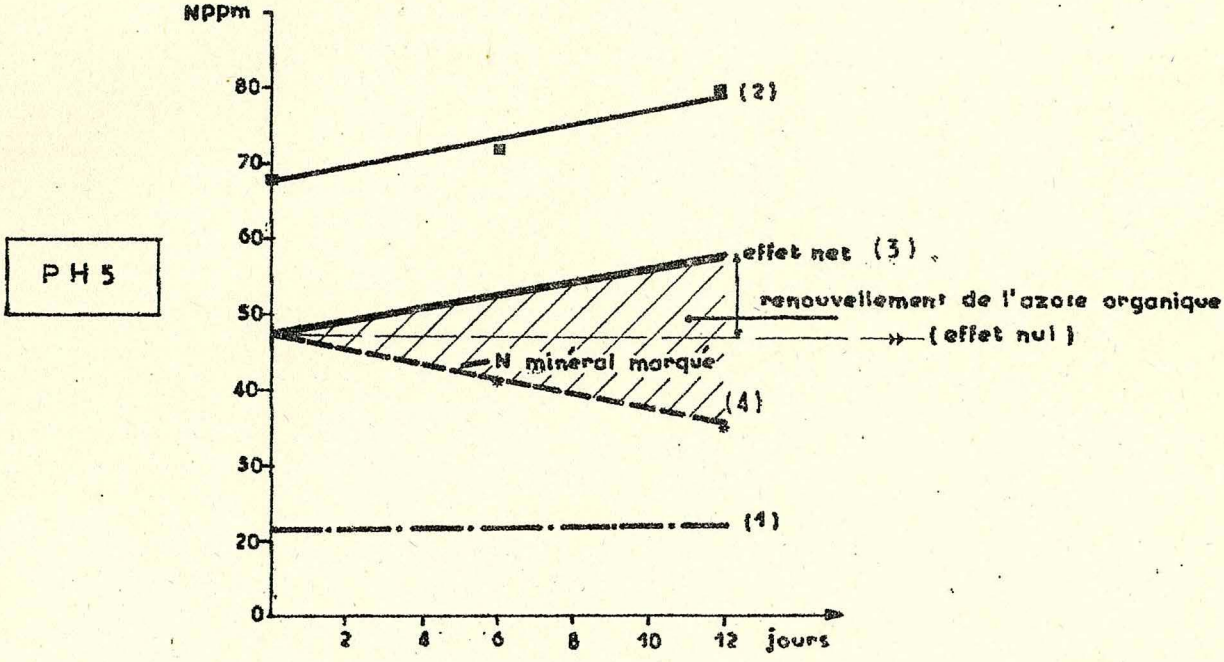
/ Témoin / : Equations avec N en ppm - T en jour.

- Minéralisation pendant 12 jours.

Droites d'ajustement							Coefficient de correlation		
pH 7,2									
	NO3	y =	11,2302	+	2,030	T	r	=	0,937
	NH4	y =	8,8661	-	0,7876	T	r	=	0,89
	NO3 + NH4	y =	21,557	+	0,4723	T	r	=	0,47
pH 5									
	NO3	y =	11,344	+	1,225	T	r	=	0,908
	NH4	y =	8,7324	-	0,746	T	r	=	0,96
	NO3 + NH4	y =	21,822	+	0,018	T	r	=	0,624
/ Sol + sulfate / (+ 41 ppm)									
pH 7,2									
	NO3	y =	8,115	+	5,007	T	r	=	0,979
	NH4	y =	44,838	-	4,292	T	r	=	0,979
	NO3	y =	52,95	+	0,71	T	r	=	0,68
pH 5									
	NO3	y =	8,374	+	3,213	T	r	=	0,990
	NH4	y =	47,018	-	2,706	T	r	=	0,971
	NO3 + NH4	y =	55,39	+	0,507	T	r	=	0,564
/ Sol + nitrate / (+ 40 ppm)									
pH 7,2									
	NO3	y =	52,483	+	0,803	T	r	=	0,74
	NH4	y =	8,852	-	0,777	T	r	=	0,94
	NO3 + NH4	y =	61,335	+	0,0267	T	r	=	0,55
pH 5									
	NO3	y =	50,520	+	0,206	T	r	=	0,40
	NH4	y =	11,297	-	0,831	T	r	=	0,92
	NO3 + NH4	y =	61,816	+	0,0624	T	r	=	0,76
/ Sol + Urée / (+ 49 ppm)									
pH 7,2	: NO3	y =	8,724	+	5,455	T	r	=	0,97
Après 1j.	NO4	y =	54,662	-	5,116	T	r	=	0,96
" 1j.	NO3 + NH4	y =	62,756	+	0,421	T	r	=	0,445
pH 5	NO3	y =	7,985	+	3,734	T	r	=	0,99
Après 2j.	NH4	y =	56,405	-	3,752	T	r	=	0,994
" "	NO3 + NH4	y =	64,067	+	0,024	T	r	=	0,53

Renouvellement de l'azote organique du sol de BOUAKE et effet net de l'apport d'engrais





(1) minéralisation (NH_4 + NO_3) du sol témoin

(2) minéralisation du sol + 50 ppm de N marqué

(3) effet net = (2) - (1)

(4) évolution de N min. N15

Fig. n° 17

Il apparait plusieurs points intéressants :

- la nitratation étant plus rapide à pH 7,2 les phénomènes d'oxydation de l'ammonium marqué sont presque terminés après 12 jours alors qu'à pH 5, seulement, la moitié de l'ammonium marqué est oxydée.
- les quantités d'azote qui semblent perdues d'après le bilan de l'azote minéral sont beaucoup plus faibles dans la réalité quand on prend les valeurs de l'azote total.

Par exemple à pH 7,2 le déficit d'azote marqué dans le pool d'azote minéral est de 40 %, alors qu'en 12 jours 25 % de l'azote engrais ajouté s'est réorganisé au sein de la matière organique et que 15 % ont été perdus par dénitrification.

A pH 5, il est plus difficile d'avancer des chiffres car les réactions ne sont pas terminées après 12 jours d'observation. On peut cependant par extrapolation penser que 45 % de l'azote engrais disparaissent du pool d'azote minéral dont 20 % par dénitrification en 25 jours.

x Le turn-over est donc extrêmement rapide :

à pH 7,2 un quart de l'azote engrais apporté est déjà réorganisé en 12 jours.

à pH 5, les phénomènes sont plus lents et les pertes plus importantes.

On peut également calculer à partir de ces données quelques caractéristiques du système formé par deux compartiments : phase minérale (2) et phase organique active (1).

Il s'agit de ce qu'on définit comme étant le renouvellement de l'azote organique du sol. Le terme traduit le fait que l'azote minéral apporté est réorganisé en partie pendant que de l'azote organique est minéralisé.

Dans notre cas, il y a bien <u>renouvellement</u> car la courbe de récupération indirecte ou d'effet net ne se confond pas avec la courbe de l'azote minéral marqué ou de récupération directe.

Le <u>renouvellement</u> est la différence en ppm de N du sol sec entre les points des courbes de récupération indirecte (effet net) et directe (N min. marqué).

On l'exprime en pourcentage de N ajouté au milieu et il représente la quantité d'azote du sol qui se minéralise à la suite de l'addition d'azote d'une source extérieure.

Nous voyons qu'après une période d'incubation de 12 jours, la différence due au renouvellement est de l'ordre de 23 ppm soit :

$\frac{23}{50}$ = 46 % de l'azote ajouté au milieu.

Après une période d'incubation de 12 jours on trouve à peu près la même valeur de renouvellement de 46 % pour pH 5. L'allure du phénomène est cependant assez différente puisque la minéralisation nette est très faible dans le sol témoin. Notons que ces valeurs sont du même ordre que celles citées dans la littérature. Par exemple Van Praag et Brigode citent pour des sols forestiers Ardennais des valeurs de 40 % pour 12 jours et 50 à 60 % en 60 jours avec 100 ppm de N apporté.

Les résultats que l'on peut tirer de cette expérience sont des vitesses de transformation de l'azote :

sol à pH 7,2 :

vitesse de disparition de l'azote minéral ajouté :

v = 1,7 ppm/j. qui se décompose en v organisation = 1,08 ppm/j.
v pertes = 0,62

vitesse de renouvellement de l'azote minéral :

v = 1,9 ppm/j.

effet net de l'apport d'azote minéral = 1,9 - 1,7 = 0,2 ppm/j.

sol à pH 5 :

vitesse de disparition de l'azote minéral ajouté : 0,95 ppm/j. dont
v organisation = 0,47 ppm/j.
v pertes = 0,47

vitesse de renouvellement de l'azote minéral :

v = 1,95 ppm/j.

effet net de l'apport d'azote = 1,95 - 0,95 = 1,00 ppm/j.

En résumé : Pour le même sol amené d'une part à pH 7,2, d'autre part à pH 5, les vitesses de réaction sont plus élevées pour un pH neutre et les échanges atteignent un niveau d'équilibre en 12 jours.

La vitesse de renouvellement de l'azote minéral est cependant du même ordre dans les deux cas, car l'apport d'azote minéral au sol stimule beaucoup plus la minéralisation de l'azote du sol a un pH acide qu'à un pH neutre.

Conclusion sur la cinétique de minéralisation :

- les sols de Bouaké et de Gagnoa ne minéralisent pas à la même vitesse. L'allure des cinétiques de courte durée est différente.
- les traitements agronomiques subis au champ ont une influence assez marquée en arrière-action sur la cinétique.
  On remarque que l'action du compost augmente le coefficient de minéralisation et ralentit la nitrification.

  Les apports de paille favorisent la nitrification et l'apport d'engrais azoté joue dans le même sens. Il existe une interaction entre l'engrais et la paille.
- le pH du sol est un facteur important. Bien que la flore présente permette une nitrification à pH acide, celle-ci est fortement ralentie par la baisse du pH du sol.
- les engrais azotés apportés au sol réagissent différemment dans le sol. L'urée et le sulfate d'ammoniac ont des effets semblables mais subissent des pertes pendant la nitrification. L'apport d'engrais stimule légèrement la minéralisation de l'azote organique du sol.
- le "turn-over" de l'azote est très rapide. La vitesse de renouvellement de l'azote est élevée ; l'azote apporté est réorganisé (25% en 12 jours) et de l'azote organique est minéralisé. L'effet de stimulation de l'apport sur cette minéralisation est plus important lorsque le sol est acide.
- plus le sol est acide, plus les pertes pendant la nitrification sont importantes. Celles-ci se produisent certainement lors de la formation du nitrite dans le sol.

3.1.3. FORME ET QUANTITE D'AZOTE MOBILE.

A - Formes mobiles de l'azote organique.

Dans notre préliminaire, nous avions distingué trois compartiments pour la matière organique.

Biomasse microbienne - Matière organique Labile - M.O. stable.

La caractérisation de ces compartiments serait la suivante :

+ la matière organique stable représente la fraction de l'azote inclue dans des polymères stables.

+ la matière organique labile est la fraction de la matière organique facilement décomposable dont l'azote est facilement minéralisé par les microorganismes.

+ la biomasse microbienne est l'agent actif des transformations et représente elle-même un stock d'azote non négligeable.

- Le fractionnement de l'azote organique selon sa facilité d'extraction permet d'étudier sa répartition dans les divers composants de la matière organique.

- Le fractionnement des formes organiques de l'azote est faite selon une procédure simplifiée par rapport à celle préconisée par Bremner. Il s'agit d'une hydrolyse acide (HCl 6N) à ébullition pendant 8 heures.

Ce fractionnement permet d'obtenir les formes suivantes :

- l'azote contenu dans la fraction légère séparée par densimétrie (debris de matière végétale peu humifiés).
- l'azote minéral du sol N-NO3 et N-NH4
- une forme d'azote non hydrolysable ou culot
- une forme hydrolysable directement distillable ou fraction azote ammoniacale provenant des hexoamines.
- une forme d'azote hydrolysable non directement distillable qu'on obtient par différence, ou fraction azote provenant des acides aminés.

En effet, il est admis que :

+ la fraction azote ammoniacal provient de l'hydrolyse des amides, des acides hydroxyaminés et des hexoamines et d'autres composés aminés.
+ la fraction relative aux acides aminés provient des acides aminés protéïniques et non protéïniques libérés par l'hydrolyse acide de formes telles que : protéïnes et complexes acides aminés - quinones ou phénols.

  Les résultats obtenus jusqu'ici indiquent que cette fraction est plus susceptible de fournir de N-min. que les deux autres fractions (Bremner).
+ l'azote du culot représente des formes stables telles que des complexes carbohydrates - composés aminés, des composés hétérocycliques (noyau indol - pyrrol - pyrimidique), des complexes lignine - NH3.

  L'azote de cette fraction est résistant aux processus microbiens.

Matériel et méthode employés pour les essais au champ.

Lors de l'emploi d'azote engrais marqué par N-15, on établit un bilan de l'azote apporté, en fin d'expérience. On analyse l'azote du sol et on détermine la proportion d'azote marqué inclu dans l'azote total (N_T) du sol. On obtient ainsi la proportion d'azote en provenance de l'engrais qui a été réorganisé au sein de la matière organique après la culture.

L'analyse des formes d'azote du sol permet de la même façon d'estimer la quantité d'azote provenant de l'engrais réorganisé , et la forme de cet azote. Ces analyses ont été faites systématiquement sur les sols des essais ayant reçu de l'azote marqué.

Résultats .

Nous donnons les résultats obtenus sur l'essai "azote-paille de Bouaké après la culture du riz en 1973. Les résultats sont donnés en pourcentage d'azote sur le graphique. La colonne de gauche représente la distribution des formes d'azote, en pour cent de l'azote total et celle de droite, la répartition de l'azote marqué dans les formes d'azote du sol en pour cent de l'azote marqué total retrouvé dans le sol. (Fig. 18)

Le tableau n° 1 donne les quantités calculées des formes d'azote correspondant. L'azote de la fraction légère n'est pas représenté étant donné les valeurs très faibles trouvées.

L'azote du sol est représenté surtout par de l'azote hydrolysable (75 % environ):hexoamines, acides aminés. Il apparaît malgré une assez grande variabilité des résultats que l'azote que l'on apporte au sol sous forme minérale marquée se combine préférentiellement dans la fraction hydrolysable non distillable (acides aminés), mais qu'il se retrouve dans toutes les combinaisons que cet élément présente dans le sol.
Ces résultats vont dans le même sens que ceux cités dans la littérature - (JANSSON 1958/TYLER et BROADBENT 1958/STEWART - JOHNSON - PORTER 1963).
Des recherches à l'IRAT et au CEA-Cadarache ont confirmé ces faits (PICHOT - EGOUMENIDES 1975/OLIVER 1973/ALZAHAWE 1976/LONGUEVAL 1976/GUIRAUD 1975).

On peut donc conclure que la plus grande partie de l'azote qui est réorganisé au sein de la matière organique après une culture, l'est sous une forme qui est susceptible d'être minéralisée par la suite. Peu de cet azote se trouve bloqué dans des combinaisons stables.

B - Effet des traitements antérieurs sur les formes d'azote utilisables par la plante.

Il s'agit de déterminer si les traitements agronomiques,que l'on applique au sol sur les essais pérennes,modifient sensiblement le stock d'azote, les formes d'azote du sol et la capacité du sol à fournir de l'azote à la plante.

c) Bouaké.

Matériel et méthode.

On a prélevé des échantillons représentatifs des 36 parcelles de l'essai azote-paille de Bouaké. Ces prélèvements ont été faits sur l'horizon 0-25 cm avant la culture de riz 1973.

Les méthodes d'étude employées, sont d'une part les analyses chimiques de l'azote [illegible], d'autre part une méthode isotopique utilisant l'azote marqué. Cette méthode s'inspire de la technique utilisée pour la mesure des effets résiduels des engrais phosphatés dans les sols (TRUONG et al 1973/PICHOT et al 1973).

Parcelles Bloc V Prélèvement après riz (1/74) Bouaké

Fractionnement des formes d'azote du sol

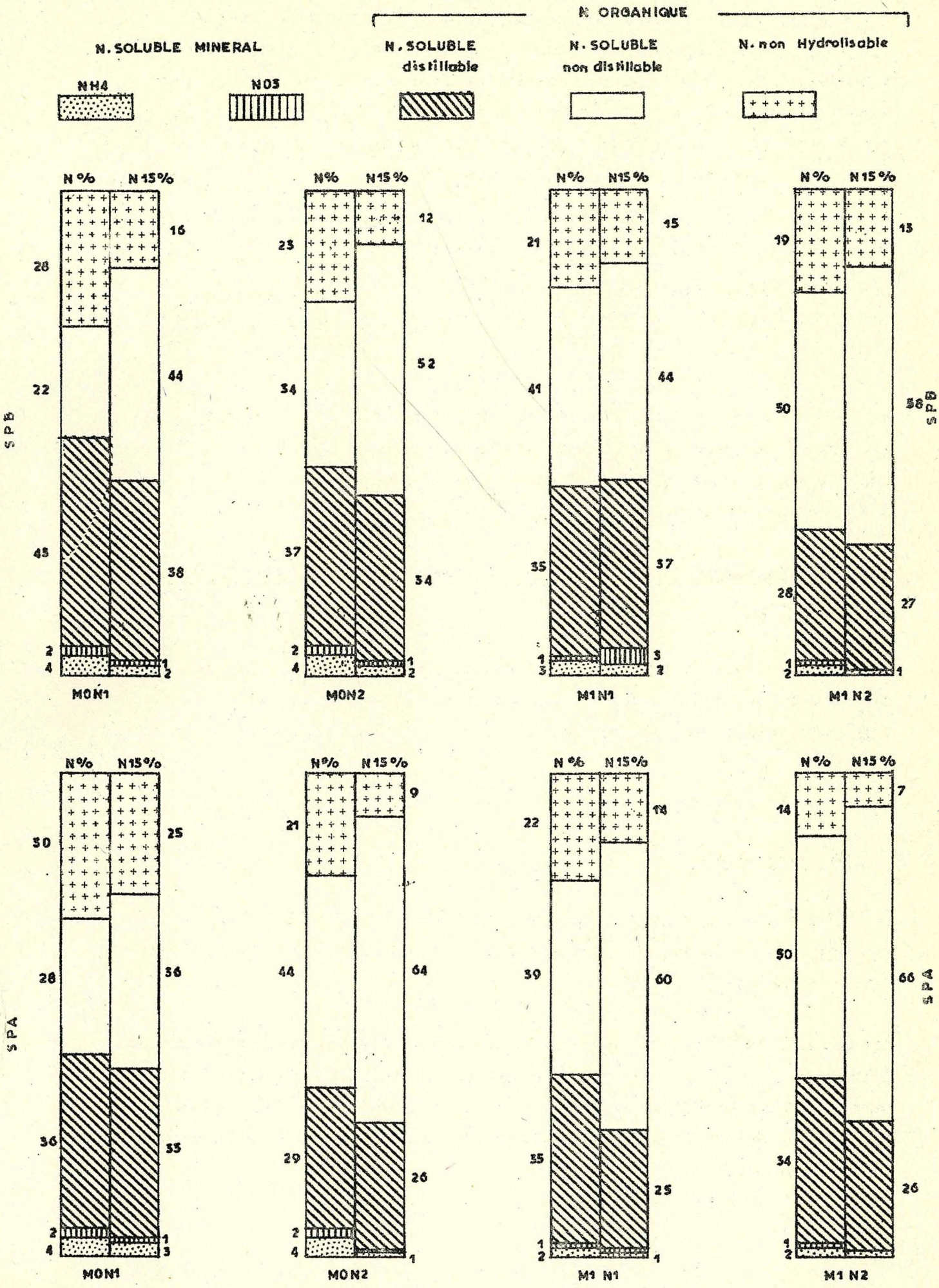


Fig. nº 18

La méthode est basée sur l'interprétation de l'utilisation par le ray-grass d'un apport uniforme d'urée enrichie en azote 15 ; l'influence des traitements antérieurs sur les échantillons mis en comparaison doit se traduire le cas échéant par des différences de taux d'utilisation de l'engrais par le ray-grass.

Cette étude est complétée par l'analyse chimique du sol après culture et la détermination des enrichissements dans les différentes fractions.

Ces diverses mesures permettent d'établir dans chaque cas des bilans de l'azote 15 introduit.

Réalisation.

L'essai est réalisé en petits vases de végétation (cultipots RIVIERA) contenant 120 g de sol.

Chaque vase reçoit un échantillon représentatif d'une parcelle de l'essai au champ.

Une fumure minérale comportant P, K, Ca, Mg, S est apportée en quantité largement suffisante sous forme de bicarbonate de potassium, de phosphate monocalcique et de sulfate de magnésium, au moment de la préparation des vases de végétation.

Une quantité uniforme d'azote : 10 mg par vase est apportée également, sous forme d'urée marquée à 5,0 % de 15 N, en solution, et bien mélangée au sol.

Le semis est effectué à raison de 250 mg de graines de ray-grass hybride 10. Une seule coupe est réalisée après 30 jours de culture. Après séchage des échantillons, on procède à la séparation des racines et du sol.

Les matières végétales sont séchées, pesées, analysées. Le sol est homogénéïsé et analysé.

Résultats - Discussion : (tableau n° 2)

Les résultats des analyses chimiques, ceux de l'essai en vases de végétation et les mesures d'excès isotopiques figurent dans les tableaux n° 2 .

- Analyses chimiques avant culture en vases.

  * Les résultats obtenus pour le carbone et les formes de l'azote organique présentent une faible variabilité avec des coefficients de variation proches de 10 pour cent. Ces résultats ne mettent en évidence aucun effet des traitements.

  * Les résultats concernant l'azote minéral, nitrique et ammoniacal présentent une forte variabilité avec des coefficients de variation élevé . On peut cependant remarquer que les apports antérieurs d'azote semblent avoir une influence sur les teneurs du sol en azote nitrique.

- Résultats de l'essai en vases.

Les diverses mesures effectuées, poids de matière sèche produit, taux d'azote de cette matière sèche, excès isotopiques, n'ont pas permis, malgré une bonne précision d'ensemble des résultats de mettre en évidence une action vraiment significative des traitements antérieurs sur la capacité des échantillons de sol à fournir de l'azote à la culture. On peut cependant remarquer que les excès isotopiques dans les racines sont plus faibles pour les traitements M1 ce qui pourrait indiquer l'amorce d'un effet favorable de la paille.

Sur le plan méthodologique, on peut remarquer que les enrichissements mesurés sur les matières végétales sont inférieurs à la moitié des enrichissements de départ. Ceci indique que l'engrais a contribué pour 40 à 50 pour cent ($kf = \frac{E^*}{Eo}$) à l'alimentation du végétal. Les 50 ou 60 pour cent restant proviennent du sol et des réserves azotées des graines.

Par ailleurs, le coefficient d'utilisation réel de l'azote apporté uniformément sur tous les vases est d'environ 68 % si l'on tient compte des feuilles et des racines.

- Analyses chimiques après culture en vases.

Les résultats des analyses réalisées sur les sols après séparation des racines ne portent que sur les formes organiques de l'azote. Des essais d'extration de l'azote minéral ont en effet montré qu'après culture le sol était dépourvu d'azote nitrique et que les teneurs en azote ammoniacal étaient très faibles (5 à 10 ppm) et présentaient une grande variabilité.

Comme les analyses réalisées avant culture, celles-ci ne donnent pas de résultats permettant de mettre en évidence une action des traitements. Les quantités d'azote total et la répartition dans les différentes formes, distillable, non distillable, non hydrolysable, ne semblent pas avoir été profondément affectées par la culture. On peut cependant remarquer une légère diminution de l'azote non hydrolysable et une augmentation de l'azote hydrolysable non distillable qui correspondent à un enrichissement en azote aminé.

Malgré la variabilité des résultats, il apparaît nettement que l'azote hydrolysable non distillable présente des enrichissements supérieurs aux autres formes. Cette forme appelée aussi azote aminé semble donc constituer la forme privilégiée pour la réorganisation de l'azote.

- Bilan de l'azote en vases.

Compte tenu de l'absence d'effets significatifs des traitements, le bilan peut être fait sur les moyennes des quantités d'azote et des enrichissements.

L'excès d'azote 15 introduit sous forme d'urée marquée étant de 500 microgrammes par vase, nous retrouvons :

340µg dans la plante = 68 %

126µg dans l'azote total du sol = 25,2 %

c'est-à-dire 466µg et un taux de récupération moyen de 93,2 pour cent.

L'azote apporté comme engrais est réorganisé pendant la culture dans les différentes formes organiques :

- 72µg dans l'azote hydrolysable non distillable = 14,4 %
- 24µg dans l'azote hydrolysable distillable = 4,8 %
- 6µg dans l'azote non hydrolysable = 1,2 %

soit 102µg = 20 %.

Nous constatons donc une perte de 24µg d'azote 15 au cours des opérations de fractionnement. Cette perte peut être attribuée à l'opération elle-même ou aux divers dosages et mesures d'excès.

Par ailleurs, on note un défaut de bilan de 7 % de l'azote marqué introduit au début de l'expérience. Cette perte d'azote peut provenir de pertes gazeuses pendant la culture en vases.

En résumé, la technique isotopique, couplée au fractionnement chimique de l'azote du sol n'a pas permis de mettre en évidence un effet des traitements agronomiques sur la capacité du sol à fournir de l'azote à la plante. On a cependant montré le rôle privilégié que joue l'azote aminé dans la réorganisation de l'azote minéral.

b) Gagnoa.

Matériel et méthode.

On a prélevé des échantillons de sols représentatifs de certains traitements de l'essai "azote + compost" après la culture 1973. (Janvier 1974) - Il s'agit des traitements sans compostsMoNo, MoN4 et ceux avec compost M1No et M1N4. Les méthodes d'étude employées sont les mêmes que celles décrites précédemment.

Réalisation.

L'essai est réalisé dans des petits pots de 120 g de sol comme l'essai précédent, mais la plante test est l'Agrostis. Deux coupes sont effectuées à intervalles de cinq semaines chacune.

Résultats et discussion : (tableaux n° 3)

Les résultats des analyses chimiques ceux de l'essai en vases et les mesures d'excès isotopiques figurent dans les tableaux : N°..3...

- Analyses chimiques avant culture en vases.

+ Seule l'influence de l'apport de compost est significative sur l'élévation du taux d'azote total (NT) du sol. Cette élévation est de l'ordre de 10 %. Cette augmentation est du même ordre pour le carbone. Le rapport C/N n'est pas modifié.

+ Ceci se traduit par une augmentation avec le compost de toutes les formes de l'azote organique. Il semble que l'azote distillable (hexoamine) soit légèrement plus augmenté que les autres formes.

Résultats de l'essai en vases.

- l'effet de la matière organique est traduit par une augmentation significative de la production végétale et de l'exportation totale d'azote par la plante.

- l'engrais a contribué pour 45 à 47 % à l'alimentation du végétal, ce qui fait un coefficient d'utilisation réel de l'azote d'environ 60 %. Le reste de l'azote prélevé par la plante est fourni par le sol, soit 53 à 55 % de l'azote mobilisé.
- Il n'y a pas d'effet significatif des traitements agronomiques sur ces chiffres.

- Analyses chimiques après culture en vases.

Après la culture, il n'y a plus d'azote minéral présent dans le sol.

On note dans les formes organiques les faits suivants :

- chute importante de la fraction aminée
- baisse de la fraction distillable
- stabilité de la fraction non hydrolysable.

La forme aminée semble bien la fraction qui se minéralise le plus facilement. Ceci a déjà été observé par de nombreux auteurs - (JACQUIN 1963/STEWARD 1963/REID 1969).

La quantité d'azote minéral apporté comme engrais, réorganisé pendant la culture représente 14 à 17 % de la quantité initiale.

La répartition montre une plus forte réorganisation dans la fraction aminée (8 %) contre 4 à 5 % dans la fraction distillable et 2 % dans la fraction non hydrolysable.

Les traitements agronomiques testés n'affectent pas significativement ces phénomènes de réorganisation.

Bilan de l'azote en vases.

Le bilan accuse un déficit de l'ordre de 12% à 20% de l'azote total, alors que le bilan de l'azote 15 apporté accuse un déficit de 20 à 25 %. Ces pertes ne peuvent survenir que par volatilisation (dénitrification) et semblent donc porter d'avantage sur l'engrais ajouté au sol.

En résumé, l'azote-engrais apporté comme traitement agronomique n'a pas d'effet sur les caractéristiques chimiques, alors que le compost a un effet net : augmentation des teneurs NT et C du sol.

Dans la culture en vases, l'effet résiduel de la matière organique se traduit par une augmentation de la matière végétale produite.

Son effet sur la capacité alimentaire du sol en azote assimilable et sur l'évolution de l'azote du sol et de l'engrais apporté n'est pas significatif.

On a montré également le rôle privilégié que joue l'azote aminé dans les phénomènes de minéralisation et de réorganisation.

- Conclusion sur les essais en vases.

A Bouaké, après 4 ans de culture, il n'y a pas d'effet des traitements agronomiques : azote et paille, sur les caractéristiques de l'azote du sol.

A Gagnoa, après 3 ans de culture, il y a un effet du traitement "compost" sur les caractéristiques chimiques du sol et notamment une augmentation de C et NT. Ceci se traduit par une augmentation de la production végétale, mais il n'y a pas d'effet net sur l'évolution des différentes formes d'azote du sol.

C - Capacité de minéralisation et de réorganisation.

Nous avons mis précédemment en évidence la nature de la forme mobile de l'azote et nous avons mesuré sa quantité dans l'azote total du sol. Mais une culture ne peut mobiliser qu'une partie de cet azote et il est en général difficile d'évaluer la quantité de minéralisation d'un sol d'une façon pratique.

La capacité de minéralisation peut être évaluée par le suivi de la dynamique de l'azote minéral du sol, comme nous l'avons fait à Bouaké. Elle peut être estimée également à un facteur près par la mobilisation de l'azote par la culture.

* Un test au champ consiste à mesurer pendant plusieurs années les exportations des cultures non fertilisées en azote.

Exemple : Bouaké - essai azote paille - Gagnoa 1974.

				1er cycle	2è cycle
1973	1974	1975	essai azote paille	90	37
Riz	Maïs	Riz	essai paille-compost	130	126
48	66	52	essai azote-compost	65	88

Cette détermination de la capacité de minéralisation dépend évidemment des antécédants culturaux et des conditions de culture.

Sur un nombre d'années assez important on peut cependant avoir une idée de la quantité d'azôte que le sol peut fournir à une culture.

* Un test au laboratoire consiste en une minéralisation en milieu contrôlé d'un sol pendant une période longue. D'autres tests biologiques sont possibles comme des cultures en vases. Mais la valeur de ces tests est relative et on ne peut vraiment en déduire l'évolution de la capacité de minéralisation d'un sol sur plusieurs années.

On notera avec les renseignements dont on dispose que le sol de Gagnoa a une capacité de minéralisation supérieure à celui de Bouaké dans les conditions réelles de culture.

Si l'on compare la répartition de l'azote dans les formes organiques, on constate les différences suivantes (moyenne des traitements).

	Bouaké	Gagnoa
Forme distillable	34 %	33 %
Forme aminée	39 %	47 %
Forme non hydrolysable	23 %	18 %

On constate qu'à Gagnoa, la forme aminée qui est considérée comme jouant un rôle privilégié dans l'azote mobile, est plus importante qu'à Bouaké. Ceci rejoint les observations faites sur la matière organique dans le chapitre I, à savoir que la M.O. de Bouaké était plus polymérisée que celle de Gagnoa et que donc les formes stables étaient plus importantes.

<u>La capacité de réorganisation</u> est la quantité d'azote minéral que le sol peut réorganiser au sein de sa matière organique. Nous avons vu que cette réorganisation se faisait préférentiellement sous une forme mobile : l'azote aminé.

La capacité de réorganisation de l'azote minéral provenant de l'engrais est très importante dans les sols étudiés.

Si nous regardons les résultats de bilan de l'azote marqué appliqué sur les séries d'essais, nous voyons que la quantité d'azote organisée varie de 30 à 70 % de la quantité ajoutée, en fonction des doses, de la date d'apport et des cultures.

* Essai "Azote-paille" - Bouaké après culture riz 1973.

N apporté	60 u.		120 u.	
	1er apport 30	2ème apport 30	1er apport 60	2ème apport 60
Immobilisé dans le sol	19 u.	15 u.	18 u.	20 u.
	34 u.		38 u.	

* Cuves lysimétriques Bouaké 1973 après riz 1973.

N apporté	60 u.	120 u.
	en 2 apports 30 u.	en 2 apports 60 u.
Immobilisé dans le sol	42 u.	66 u.

* Essai Paille compost Gagnoa 1974 après maïs.

N apporté à 25 jours	100 u.
Immobilisé	50u.

* Essai "Azote - compost" Gagnoa 1974 après maïs.

N apporté	80 u.	
	1er apport 40	2è apport 40
Immobilisé	18	24
	42 u.	

* Essai "Azote-paille" - Gagnoa 1974 après maïs.

N apporté	50 u.		100 u.	
	1er ap. 25	2ème ap. 25	1er ap. 50	2ème ap. 50
Immobilisé	9	12	18	21
	21		39	

Les enfouissements de paille ou de compost ne montrent pas d'effet très important sur cette réorganisation. Vu la variabilité des résultats obtenus, les effets sont en général non significatifs (cv = 18 à 30 %).

Exemple : Proportion d'azote de l'engrais organisé dans le sol, dans l'essai "paille compost" en fonction des traitements :

- Sans paille enfouie 48 %
- Avec paille 53 %
- Avec compost 53 %.

L'importance et la vitesse de la réorganisation de l'azote-engrais que l'on apporte au sol limitent les pertes possibles de cet azote par lixiviation. Nous avons vu que pour des pH acides il faut environ 25 jours pour que 25 % de l'engrais ajouté soit réorganisé dans des conditions de sol non cultivé.

3.1.4. Conclusion sur la minéralisation et la réorganisation.

- L'étude, en conditions naturelles, de la dynamique de l'azote met en évidence les cycles successifs et l'intensité de la minéralisation de l'azote du sol ainsi que l'effet et le devenir de l'engrais azoté apporté à différentes cultures. Cet azote engrais reste disponible en partie sous forme minérale pendant un certain temps dans le sol quand la plante n'a pas de gros besoins azotés. Il semble inutile de faire des apports quand il y a suffisamment de N minéral dans le sol, ce qui est le cas en début de culture.
- La cinétique de minéralisation dépend du type de sol, mais elle est aussi influencée par les traitements agronomiques subis et notamment par l'acidification du sol.

  Dans les sols acides, la minéralisation est moins intense et l'azote est soumis à des pertes gazeuses par dénitrification plus importantes.
  La stimulation de la minéralisation de l'azote du sol par des apports d'engrais est cependant plus marquée dans des sols acides.
- L'azote que l'on apporte au sol se réorganise rapidement et en quantité importante au sein de la matière organique. Cette réorganisation se fait dans toutes les fractions de l'azote du sol mais principalement dans la fraction azote aminé qui est susceptible d'être facilement minéralisée.

  Cette fraction représente la plus grosse part de la forme mobile de l'azote du sol.

A moyen terme, les apports d'engrais azotés ne jouent ni sur la quantité ni les formes d'azote du sol. Les apports de paille ne semblent pas non plus avoir d'influence marquée.

Par contre, l'apport de compost améliore la quantité d'azote total du sol, sans modifier précisement la répartition de l'azote dans les formes organiques. La nutrition azotée des plantes est améliorée par le traitement compost.

- Bien que la cinétique de minéralisation du sol de Gagnoa soit plus lente que celle de Bouaké, la capacité de minéralisation est plus importante. Ceci semble lié à la répartition de l'azote dans les formes organiques, la forme aminée domine nettement dans le sol de Gagnoa, alors qu'à Bouaké la forme stable est plus importante qu'à Gagnoa.

3.2. DENITRIFICATION CHIMIQUE.

Généralités.

Il s'agit d'un phénomène mal étudié, bien que la réaction soit connue de longue date en sol acide (ROBINSON 1923/SMITH et CLARK 1960/BREMNER 1968/ NELSON 1969) (voir au chapitre I).

Ces recherches montrent que la décomposition du nitrite est régie en grande partie par le pH du sol et qu'une neutralisation de son acidité non seulement inhibe le processus mais favorise l'accumulation du nitrite (DROUINEAU 1948/MILLBANK 1959).

Nous avons signalé précédemment que dans les sols de Bouaké, 10 ppm de nitrite disparaissent en quelques heures sans pour autant augmenter la quantité d'azote minéral.

A partir de ces premiers résultats, on a tenté de quantifier ce phénomène par un calcul préliminaire fait sur la base des données recueillies lors de l'expérience de minéralisation du sol de Bouaké dont les résultats sont donnés précédemment.

Nous avons utilisé le modèle de nitrification de H. LAUDELOUT présenté en langage CSMP (Continous system modeling program = Langage similaire au Fortran) et qui est expliqué par la suite.

En l'absence d'indication concernant la vitesse de dénitrification du nitrite nous avons calculé l'évolution des concentrations en nitrite et en nitrate pour trois ordres de grandeur de décomposition de nitrite.

Le résultat essentiel de ce calcul est l'estimation de la perte d'azote qu'implique la dénitrification du nitrite que l'on peut obtenir à partir de la teneur finale en azote nitrique et de la teneur que l'on aurait du obtenir en absence de dénitrification.

Les constantes de dénitrification choisies conduisent à une perte de 10% pour une constante de 0,1 jour^{-1}, 45% pour 1,0 jour^{-1} et 80% pour 10 jour^{-1}. Les pertes tiennent compte de l'apport de 10 ppm de N-NH4.

Ces valeurs encadrent certainement la valeur réelle de dénitrification.

Ce phénomène paraissant d'une certaine importance dans ce type de sol, une étude plus poussée a été engagée sur la cinétique de décomposition chimique du nitrite en milieu homogène et hétérogène (solution aqueuse et solution du sol). Cette étude a été principalement réalisée dans le laboratoire de chimie du sol de l'Université de Louvain par L. GERMAIN en 1975.

Nous présenterons les principaux résultats pratiques qui intéressent directement les sols étudiés ici. La cinétique de la décomposition chimique du nitrite a été étudiée en détail, l'application de ces résultats au calcul d'après un modèle de simulation donne les pertes par dénitrification dans les sols, en fonction d'un certain nombre de paramètres que l'on peut faire varier.

3.2.1. Etude de la cinétique de décomposition chimique du nitrite.

* Les résultats obtenus en milieu homogène avec des solutions de tampons acides, montrent que la teneur en nitrite diminue exponentiellement avec le temps. La loi de vitesse exprimant cette décomposition est :

$$\frac{dNO2}{dt} = - K1\ NO2$$

K1 est une constante de vitesse qu'on obtient en linéarisant la relation du processus.

$$\ln \frac{(NO2)\ t}{(NO2)\ o} = - K1\ t$$

L'intégration de l'équation montre que la teneur en nitrite diminue exponentiellement avec le temps.

$$(NO2^-)\ t = (NO2^-)\ o \cdot e^{-K.t}$$

K1 s'obtient expérimentalement par détermination graphique de la pente de cette droite ou par regression linéaire.

Le temps de demi-réaction (T) est l'intervalle de temps nécessaire pour que la moitié de la teneur initiale en nitrite ait disparu, soit :

$$(T) = \frac{\ln 2}{K1} = \frac{0,693}{K1}$$

Cette constante de vitesse K1 dépend de la concentration en ion hydrogène des tampons acides incubés à diverses températures.

De la pente des droites obtenues, on déduit la constante de vitesse du second ordre KH qui rend compte du rôle catalytique de l'ion H^+. La relation entre K1 et C_{H+} (teneur en ion H^+ en mML^{-1}) s'écrit :

$$K1 = K1^{o} + K_H \; C_{H+}$$

K_H varie linéairement en fonction de la température selon une relation d'Arrhénius :

$$\ln KH = \ln K_H^{o} - \frac{Ea}{RT}$$

Ea représente l'énergie d'activation de la réaction (cal. $mole^{-1}$)

T la température absolue

R la constante des gaz (1,98 cal. deg^{-1} $mole^{-1}$)

$\frac{Ea}{R}$ définit la pente et s'obtient par le calcul d'une regression des valeurs ln KH sur $\frac{1}{T}$.

* <u>La dénitrification en milieu hétérogène</u> dans les sols est mesurée après incorporation d'une quantité équivalente à 10 mg de N nitrite par kg de sol sec ($NaNO_2$). On titre alors régulièrement le taux de nitrite présent pendant 12 heures.

On voit que pour un même sol, la linéarité de l'évolution de la teneur au cours du temps est vérifiée pour une température et une humidité constante. D'autre part, les constantes de dénitrification sont fonction de l'humidité du sol et de la température. La disparition du nitrite est d'autant plus lente que le pourcentage d'eau s'accroît et elle augmente avec la température lorsque la teneur en eau est maintenue constante. Le comportement de K1 vi-à-vis de l'humidité des sols s'explique de la façon suivante : un accroissement de la quantité d'eau entraine une dilution des ions H^+, donc une neutralisation de l'effet catalytique des protons dans la réaction de réduction chimique du nitrite.

On peut montrer par des considérations basées sur la théorie du complexe activé que l'entropie d'activation de la réaction du nitrite dans les sols n'est que très légèrement supérieure à celle de la réaction en milieu homogène. Cette identité avait déjà été observée pour d'autres phénomènes catalysés par les ions H^+. Il est intéressant de montrer que dans les sols, les ions hydrogène agissent comme catalyseurs de manière aussi efficace qu'en milieu homogène.

La représentation des valeurs de la constante de vitesse K1 en fonction de la concentration en ion hydrogène dans la solution du sol est une droite, comme dans un milieu homogène. La concentration en ion hydrogène est fonction de l'acidité d'échange du sol et de sa teneur en eau pendant l'expérience.

Les propriétés chimiques des sols étudiés ici sont :

	pH (H2O)	pH (Kcl)	H^+ éch.	Al^{3+} éch.	Ac. totale
Bouaké	6.3	5.5	0.024	0.0	0.024
Gagnoa	5.0	4.2	0.347	0.143	0.49

Pour ces deux sols, la constante K1 mesurée expérimentalement est (pour Hu = 12 % à 30°) :

Bouaké = 0.02 $heure^{-1}$

Gagnoa = 0.26 $heure^{-1}$

Cette constante varie en fonction de l'humidité =

Par exemple pour le sol de Gagnoa : H = 10 % — K1 = 0.29

H = 15 % — K1 = 0.17

H = 20 % — K1 = 0.14

3.2.2. Estimation des pertes par dénitrification par l'application d'un modèle de nitrification dans les sols.

3.2.2.1. Présentation du modèle.

Il s'agit d'une approche mathématique du phénomène biologique de la nitrification qui se décompose de la manière suivante.

1. Vitesse d'oxydation des composés azotés.

La plus grande partie des travaux effectués sur la cinétique de la nitrification dans les sols reposait sur l'utilisation de relation de simple proportion entre la concentration en substrat et la vitesse de son oxydation (Mac Larren) ou encore par des relations purement empiriques, que l'on calculait d'après les droites obtenues par des expériences de minéralisation du sol, comme nous l'avons fait précédemment.

En réalité l'oxydation biologique d'un substrat peut être exprimée par une relation de Michaelis - Menten :

$$\frac{dc}{dt} = - An\ C/\ (Km + C)$$

où C = est la teneur en ammonium ou en nitrite

n = le nombre de nitrifiants (Nitrosomonas ou Nitrobacter)

Km = la constante de Michaelis pour le substrat considéré soit la concentration à laquelle la moitié de la vitesse maximum se réalise.

A = l'activité spécifique qui mesure la vitesse de disparition du substrat par cellule à une concentration en substrat telle que $C \gg Km$.

$$A = - \frac{1}{n} \frac{dc}{dt} = - \frac{1}{n} \frac{dn/dt}{dn/dc} = Kc/R$$

R = est le rendement molaire de la croissance des microbes

Kc = est le taux spécifique de croissance de la population microbienne.

Autrement dit A.n représente la vitesse maximum de croissance atteinte asymptotiquement lorsque $C \gg Km$.

Deux équations de ce type permettent de traduire la cinétique d'oxydation de NH4 et de NO2.

2 - Vitesse de croissance des nitrifiants.

La vitesse maximum qui peut être réalisée dépend du nombre de cellules de nitrifiants présentes à un moment donné. Pour pouvoir calculer cette valeur, il est nécessaire de connaitre l'activité nécessaire des bacteries. Ce calcul est facile si l'on dispose de la constante de multiplication des cellules définie par

$\frac{dn}{dt}$ = Km et d'autre part du rendement molaire de la croissance défini par

$$R = - \frac{dn}{dc}$$

L'activité spécifique étant $\frac{Kc}{R}$ comme nous l'avons montré auparavant.

Si la concentration en substrat augmente, la vitesse de multiplication $\frac{dn}{dt}$ augmentera suivant une loi identique à la loi de Michaelis qui est souvent appelée loi de Monod :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{Kc\ n\ C}{C1 + C}$$

Kc et C1 sont des constantes caractéristiques de chaque organisme.

Elle exprime que le coefficient de multiplication des bacteries tend asymptotiquement vers une valeur Kc dont la moitié sera réalisée à une concentration C1.

3. Vitesse de production de l'ammonium.

L'humectation du sol après une période ou une saison sèche s'accompagne d'une prolifération de la microflore tellurique et se traduit par une ammonification rapide. On peut considérer la vitesse de décomposition du substrat organique comme une réaction du 1er ordre.

$$\frac{d\,(NH4)}{dt} = Ko\ (N)$$

N = teneur en azote organique minéralisable

NH4 = ammonium produit

Ko = constante de vitesse d'ammonification.

Une des raisons pour laquelle beaucoup d'auteurs ont préféré la formulation linéaire pour l'expression de la relation entre vitesse d'oxydation et concentration du substrat est la facilité d'interprétation des relations différentielles ainsi obtenues. La linéarité ne peut être observée que sur des périodes courtes d'incubation. Le système décrit ci-dessus implique plusieurs équations différentielles simultanées puisque le substrat de la 2ème oxydation est le produit de la 1ère qui dépend de l'ammonisation et puisque les vitesses d'oxydation et de croissance sont liées par l'existence d'un rendement molaire constant. La solution numérique de ce système peut être donné par la disponibilité d'un langage de programmation CSMP.

On a montré que la solution numérique du système représentait correctement la cinétique de l'oxydation de l'ammonium par une culture mixte de nitrifiants (LAUDELOUT 1974).

L'avantage de cette méthode est que les paramètres qui ont été introduits sont propres aux caractéristiques biologiques et n'ont pas été ajustés pour les besoins de la cause. Par conséquent, si cette solution ne peut décrire parfaitement la cinétique d'oxydation de l'ammonium, elle permet de la décrire de façon suffisamment précise avec plusieurs paramètres que l'on peut faire varier, comme par exemple la température.

En effet, on sait que la relation entre un paramètre biologique et la température est donnée par l'expression d'Arrhénius :

$$K = A \exp. (- Ea/RT)$$

ou A est une constante, Ea l'énergie d'activation caractéristique du processus, R la constante des gaz et T la température absolue.

Ainsi il est possible de formuler l'allure de la cinétique de l'oxydation biologique de NH4 à des températures s'étendant de 0 à 30°.

4. Vitesse de réduction chimique du nitrite.

On constate que pour des températures faibles correspondant à celles des pays tempérés, il n'y a pas d'apparition nette de nitrite, mais que pour des températures supérieures à 25°, les nitrites apparaissent nettement. Des exemples ont été cités de toxicité des nitrites dans des sols alcalins de pays chauds.

La conclusion que l'on peut tirer de ces phénomènes est que les nitrites formés peuvent réagir avec des composés chimiques dans les sols acides et provoquer ainsi une perte gazeuse par décomposition de l'azote initial.

Ceci a été vérifié dans les sols de Bouaké et de Gagnoa où 10 ppm de nitrite ajouté disparaissent en quelques heures sans produire de nitrate. Par conséquent la démarche à suivre pour le calcul de la perte en azote causée par cette réaction consiterait à écrire une 6ème équation différentielle qui exprimerait la relation entre la vitesse de décomposition du nitrite et sa concentration. Jusqu'alors, aucun auteur n'avait pu préciser le rôle des facteurs conditionnant la vitesse de décomposition des nitrites et la cinétique de cette décomposition. Cette cinétique mesurée est du 1er ordre car le graphique semi-logarithmique de la concentration relative en fonction du temps donne une droite. On a la relation :

$$\frac{d\,NO2}{dt} = - K1\ NO2$$

K1 = constante de vitesse de la réaction qui est déduite de la pente de la droite du graphique. L. GERMAIN a montré qu'il existait une relation linéaire entre la concentration en H^+ du sol et la constante de dénitrification. La concentration dans la solution du sol est calculée compte tenu de l'acidité totale d'échange et de la teneur en eau du sol. On assimile donc les ions H^+ présents à des ions H^+ libres en solution.

Les constantes de vitesses obtenues sont représentées en fonction de la teneur en H^+ dans une solution d'un mélange tampon et dans la solution d'un sol par des droites.

5. Vitesse de production du nitrate.

La quantité de nitrate produit au cours du temps s'exprime aisément sous forme de bilan :

$$(NO3)\ t = \sum_i (NO3^i - NH4^i + NO2^i + NH4\ prod.)$$

$$- \sum_t (NH4\ résid. + NO2\ résid. + NO2\ pertes)$$

où $\sum_i$ représente la somme des teneurs initiales et produites.

$\sum_t$ la somme des concentrations en ammonium et nitrite résiduel et en nitrite réduit au cours du temps.

6. Estimation de la perte en azote durant la nitrification.

Une application de ce modèle est le calcul des pertes d'azote par dénitrification que subit le sol pendant la nitrification.

Cette perte s'exprime par rapport aux quantités initiales et produites :

$$Perte = \frac{(NO2)\ réduit.\ 100}{(NH4^i + NO2^i + NO3^i + NH4\ produit).}$$

Voir annexe tableaux n° 4 - 5 - 6 - 7 - 8.

3.2.2.2. Application du modèle à un exemple du sol de Bouaké.

1. Introduction des paramètres.

La constante de minéralisation de la matière organique a été déterminée à partir des coefficients de regression obtenus par l'étude de la variation expérimentale de l'ammonium et du nitrate.

$$\frac{dn}{dt} = - KoN \qquad N = No \ \exp. \ (- KT)$$

la production journalière d'ammonium est estimée à 0,35 mML^{-1}(millimole par litre) compte tenu d'une humidité de 12%. Ceci correspond à environ 1/1800 de la quantité initiale d'azote organique (900 ppm) soit de 530 mML^{-1}.

$$Ko = 2.303 \log \frac{(1 - N)}{No} = 0.0010 \text{ jour}^{-1}$$

- Les teneurs initiales en ammonium, et nitrate sont celles de l'expérience.
- La vitesse d'oxydation de l'ammonium en nitrate déduite des droites de regression permet d'estimer la densité initiale de la microflore nitrifiante en prenant pour l'activité spécifique le rapport du taux de croissance au rendement molaire.
- La constante K1 de dénitrification a été mesurée à 12 % d'humidité à 30° dans le sol de Bouaké à pH 6,2.

$$K1 = 0.020 \text{ heure}^{-1}$$

$$= 0.5 \text{ jour}^{-1}$$

- Les autres paramètres d'énergiesd'activations utilisées pour le calcul de la cinétique de nitrification sont donnés dans le tableau n° 4 .

2. Résultats et discussion.

A - Effet de la réduction chimique et de l'ammonification.

Les courbes théoriques de la figure n° 19 ont été obtenues en introduisant dans le calcul toutes les valeurs des paramètres.

On voit que l'accord est satisfaisant, bien que la disparition de l'ammonium diffère quelque peu : les courbes théoriques ont une allure sigmoïdale plus prononcée que le tracé expérimental. Le taux de production de nitrate est normal.

Nous avons profité des possibilités offertes par la programmation CSMP pour adjoindre au modèle trois valeurs de la constante de vitesse de réduction des nitrites : K1 = 0,0 - 0,5 et 1,7 $jour^{-1}$ et d'autre part deux valeurs de la constante de vitesse d'ammonification Ko = 0,0 et 0,00075 $jour^{-1}$.(*)

Il est évident que la diminution en azote nitrique est d'autant plus accusée que s'accroît la vitesse de dénitrification (figure n° 20).

La figure 21 présente les résultats des calculs obtenus pour la simulation de la nitrification à 30° à deux valeurs des constantes cinétiques de minéralisation et de dénitrification, Les courbes en trait continu confirment qu'une décomposition rapide de l'azote organique favorise une augmentation des pertes en cours de nitrification.

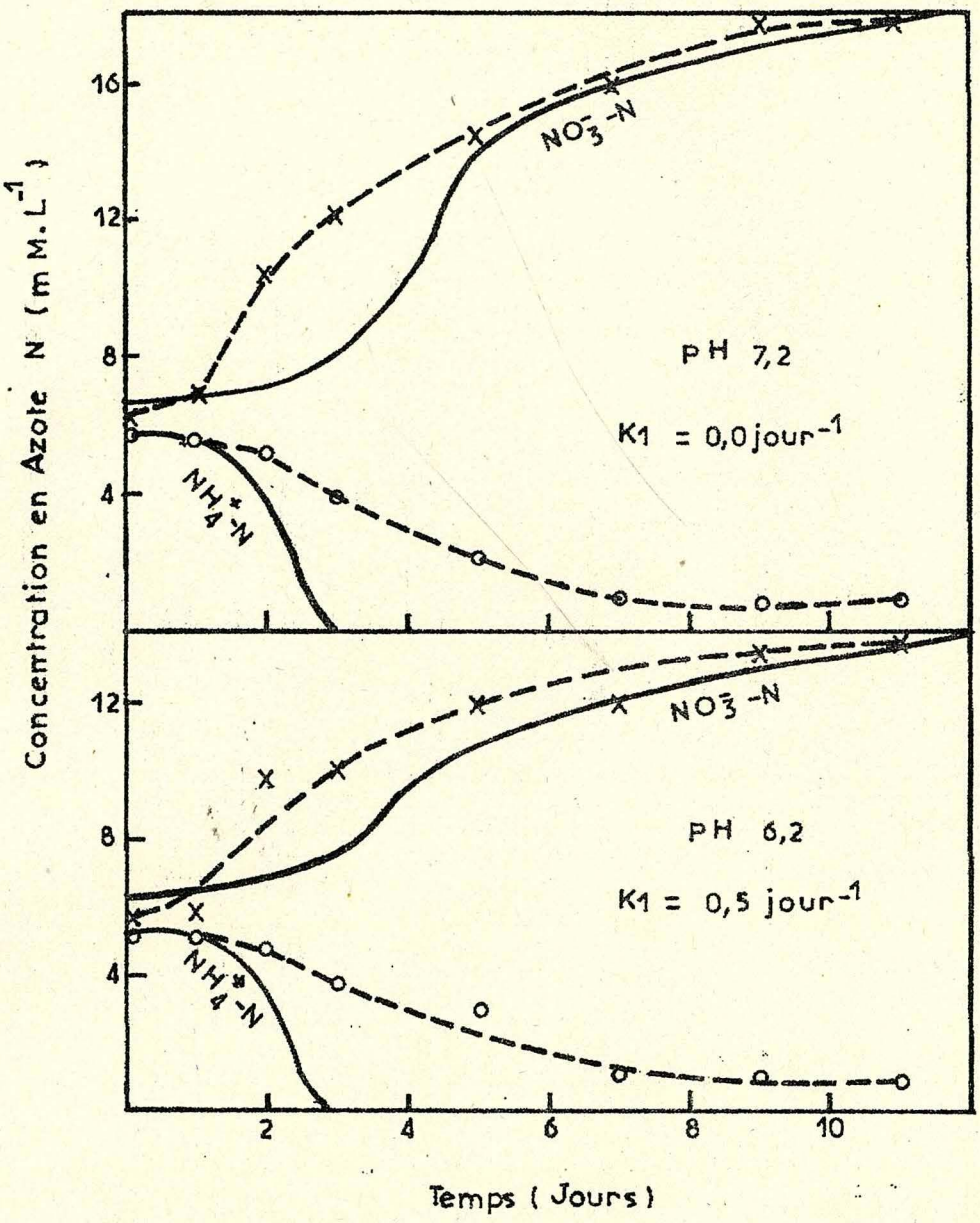
Elles sont en moyenne de 20 à 30 % selon les conditions et peuvent dépasser 50 % des teneurs initiales en azote minéral dans certains cas.

Effet du rapport des populations de nitrifiants.

Il y a compétition entre les réactions chimiques et biologiques. Un accroissement des populations de nitrobacter par rapport à celles de nitrosomonas devrait favoriser l'oxydation biologique et donc amenuiser les pertes.

La figure n° 22 montre qu'il en est ainsi. Cependant la réduction des pertes n'est vraiment sensible que pour des rapports de population peu vraisemblables = il faudrait 10 nitrobacter contre 1 Nitrosomonas pour réduire les pertes de moitié.

* Ko = 0.00075 j^{-1} représente la minéralisation de 1 % de l'azote organique présent par mois, ce qui est généralement observé dans les sols tropicaux.

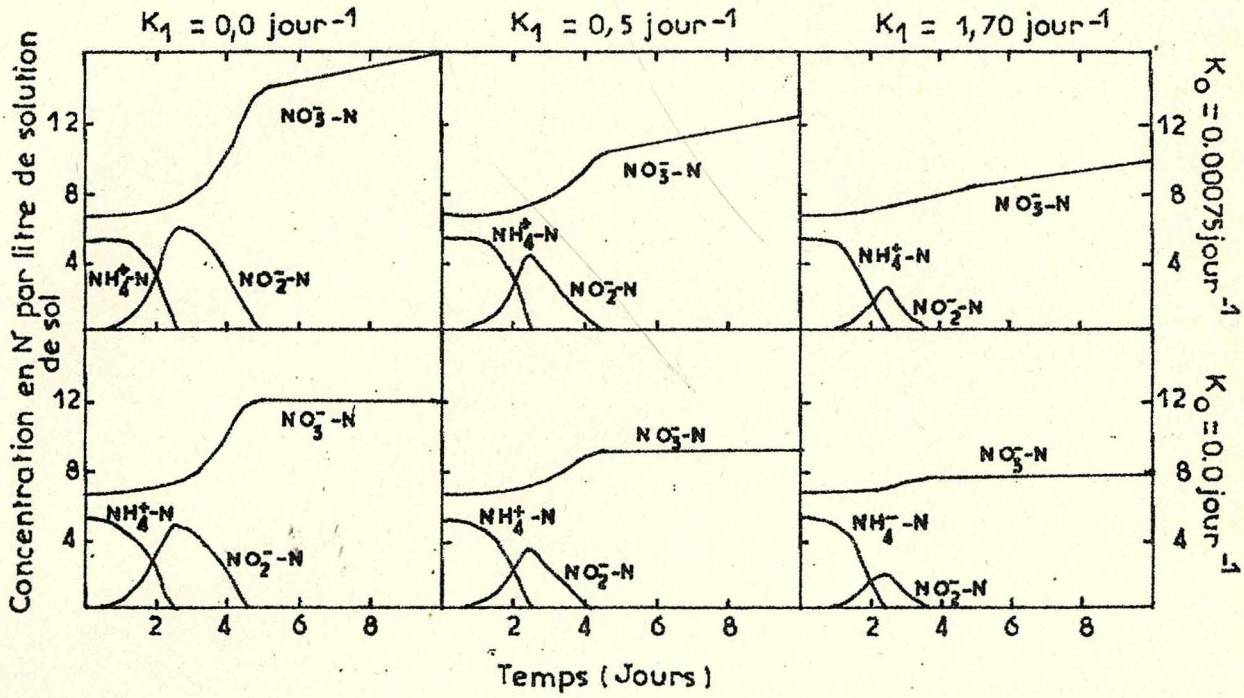


Courbes théoriques et expérimentales de la nitrification dans les sols. Deux valeurs de la constante de vitesse de dénitrification (K_1 = 0,0 et 0,5 jour^{-1}) et une valeur de la constante de minéralisation (K_0 = 0,001 jour^{-1}) ont été choisies.

——— Courbe théorique

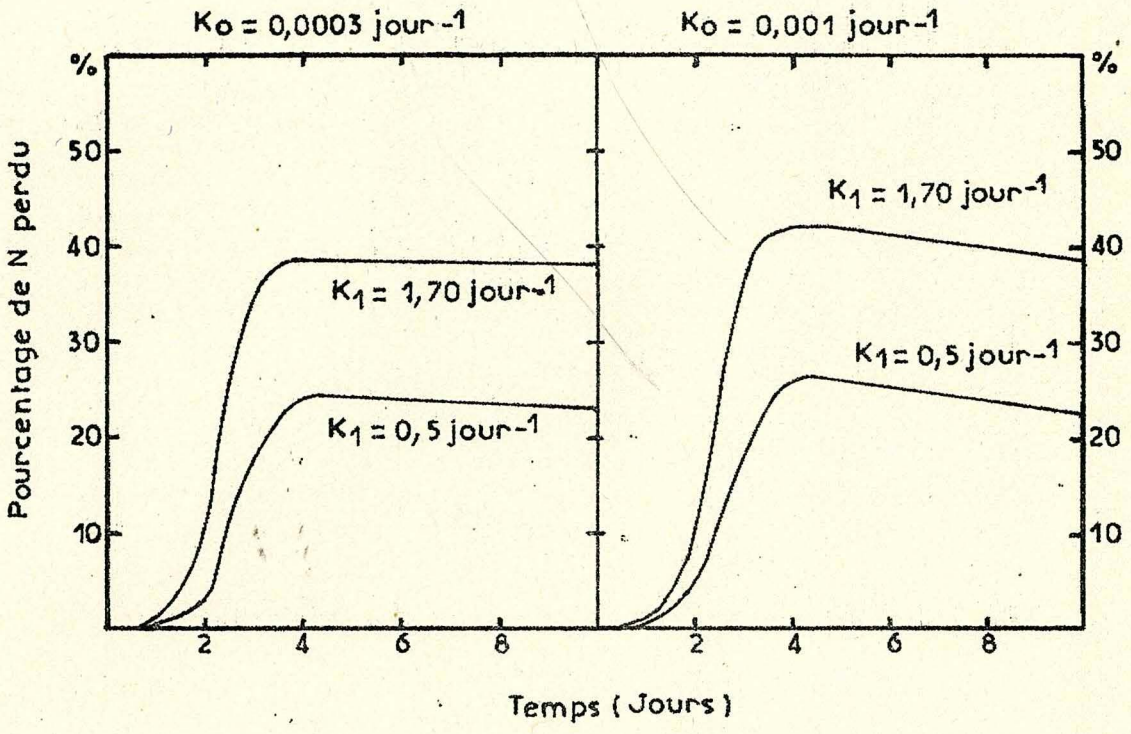
– – – – Courbe expérimentale

Fig. nº 19



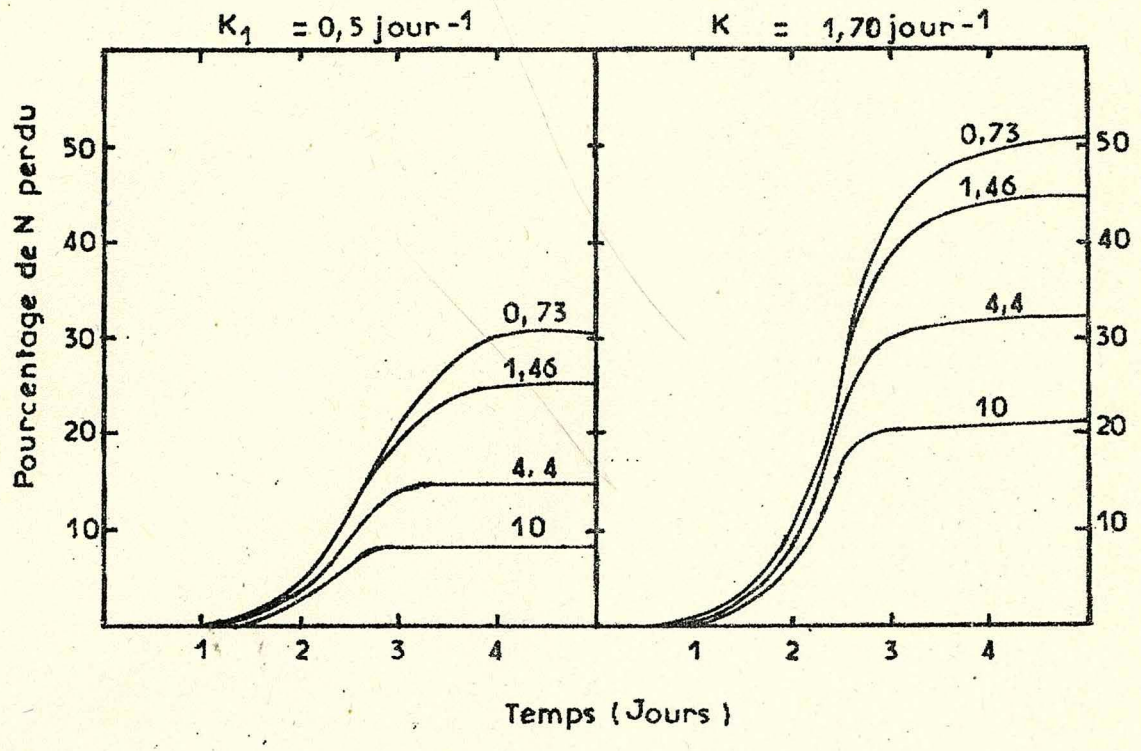
Evolution théorique des teneurs en ammonium nitrite et nitrate dans les sols acides. Les simulations ont été effectuées à 30°C, pour trois valeurs de k_1 (0.0, 0.5 et 1.7 jour^{-1}) et deux valeurs de k_o (0.0 et 0.00075 jour^{-1}).

Fig. nº 20



Pertes provoquées par dénitrification chimique du nitrite (K_1 = 0,5 et 1,7 jour^{-1}) en présence d'une minéralisation du substrat organique (K_o = 0, 0003 et 0, 001 jour^{-1}) à 30°C. La perte est rapportée à la somme des teneurs initiales et produites.

Fig. nº 21



Effet des nombres initiaux de bacteries nitrifiantes sur les pertes en azote dans les sols à 30°C pour deux valeurs de la constante de décomposition du nitrite (K1) et une valeur de la constante de minéralisation du substrat organique ($K_0 = 0,001$ jour^{-1}). Le nombre initial de cellules Nitrosomonas est de 0,45 millions /ml de solution du sol, le nombre de cellules Nitrobacter se retrouve en multipliant celui de Nitrosomonas par chacun des rapports (0,73 à 10).

Fig. nº 22

3.2.2.3. Conclusion.

L'étude de la cinétique de la dénitrification chimique montre que dans les sols acides à température élevée et à faible humidité, les pertes d'azote à partir du nitrite sont très importantes.

Ces pertes peuvent donc avoir lieu lors du passage de l'azote au stade de nitrite pendant la nitrification.

L'estimation de ces pertes par l'application d'un modèle mathématique de la nitrification montre qu'elles sont plus importantes qu'on pouvait le penser.

Ces pertes sont estimées à des valeurs variant de 20 à 40 % de l'azote minéral selon la vitesse de minéralisation de l'azote organique et l'acidité du sol qui favorise ces pertes. Dans le sol, il est fréquent de mesurer des teneurs en N-NH4 de 20 ppm et il arrive d'avoir des pics de 60 ppm. Si l'on applique donc le calcul, on arrive à des pertes de 8 voire 25 ppm dans les conditions les plus défavorables, soit environ 25 à 75 unités d'azote à l'hectare. Ce genre de pertes peuvent avoir lieu en quelques jours après l'apport d'un engrais azoté à un sol.

Il faut remarquer comme nous l'avons signalé dans l'introduction, qu'un modèle est toujours adapté au but poursuivi. Le but ici était de pouvoir estimer les pertes en azote au cours des quelques jours qui suivent le déclanchement de la nitrification. Le résultat obtenu est basé sur l'accord entre les prévisions du modèle et les résultats expérimentaux. Certains paramètres n'ont pas été considérés, même s'ils avaient pu se reveler importants pour des expériences à long terme. Les simplifications rendent impossibles l'utilisation du modèle sur des périodes longues, ou dans des conditions telles que certaines suppositions faites ne soient plus valables. (Par exemple : inhibition des vitesses de réaction par une concentration trop grande du substrat). D'autre part, la température choisie de 30° étant à peu près l'optimum pour le développement des bacteries, on ne peut pas extrapoler pour savoir l'effet des très hautes températures du sol enregistrées (jusqu'à 50°) sur les pertes.
Il est cependant certain qu'il faut tenir compte pour le bilan de l'azote du sol d'une part assez importante des pertes dues à la dénitrification chimique.
Ces pertes peuvent être estimées également au champ par le calcul du bilan de l'azote marqué apporté au sol.

3.3. PERTES PAR LIXIVIATION.

Il nous est apparu important lors de l'étude de la dynamique de l'azote, de pouvoir quantifier les pertes par lixiviation du profil cultural qui semblaient à priori importantes (ROOSE 1972).

En effet, le nitrate formé dans les couches superficielles du sol est entrainé en profondeur par la percolation des eaux de pluies. Il se déplace suivant une onde de concentration dans le profil et échappe après une certaine migration à la zone d'action du système racinaire des cultures en place. Cet azote est donc perdu pour le système étudié.

La difficulté est de quantifier cette migration en fonction de la minéralisation, de l'eau percolante et de la capacité de rétention en eau du sol.

Cette étude est facilement réalisable par des prélèvements réguliers de sols à différentes profondeurs dans un profil homogène. On suit alors le déplacement de l'onde nitrique qui suit une loi de diffusion avec convection. Etant donné l'hétérogénéïté des sols à Bouaké et l'éloignement de la station d'étude de Gagnoa, il nous a semblé préférable dans une première approche d'estimer les pertes par l'intermédiaire de cuves lysimétriques installées au champ.

3.3.1. Matériel et Méthodes.

Nous avons choisi le type de cuve ORSTOM utilisée par ROOSE dans ses études de lixiviation en Côte d'Ivoire. Il s'agit d'un cylindre de tôle de 63 cm de diamètre qui est enfoncé en force dans le sol. Celui-ci reste non remanié dans la cuve. Les percolats sont recueillis par un entonnoir de tôle qui est soudé à la base du cylindre dans le sol.

Nous avons choisi une profondeur d'étude standart qui correspond environ à la couche de sol capable d'alimenter en eau la culture en place. Ceci ressort d'observations et de mesures de l'eau du sol effectuées au champ par la méthode de mesure neutronique couplée aux mesures tensiométriques (KALMS - communication personnelle). Cette profondeur est de 80 cm. Il semble que le coton puisse utiliser une tranche de sol légèrement supérieure à 80 cm.

Toutefois, la profondeur d'enracinement de ces cultures ne dépasse pas 40 à 50 cm dans les sols très graveleux.

Nous avons donc distingué dans les sols graveleux de Bouaké la couche 0-45 cm qui correspond à la zone directement exploitée par le système racinaire de la culture et la zone 0-80 cm au delà de laquelle l'eau et les éléments solubles sont estimés perdus pour le système.

Les cuves sont installées près des essais azote-paille à Bouaké et à Gagnoa et sont cultivées de la même façon avec des traitements différents correspondant à ceux de l'essai.

Le dispositif expérimental est le suivant :

<u>Bouaké</u> : 8 cuves de 0,45 cm et 2 cuves de 0,80 cm le sol n'est pas remanié dans les cuves.

<u>Gagnoa</u> : 4 cuves de 0,80 cm.
Les cuves sont cultivées comme les essais "azote-paille" dont elles dépendent et reçoivent à chaque cycle cultural une fertilisation forte en éléments (voir protocoles en annexe).

<u>Bouaké</u> : 1973 - Riz variété - Iguape Cateto
1974 - Maïs H507 - et Coton Allen

<u>Gagnoa</u> : 1973 - Maïs H507 - 2 cycles
1974 idem.

Les apports d'azote sont fractionnés en deux fois et sont effectués sous forme d'urée.

La moitié des cuves reçoit un apport de paille équivalent à 5 t/ha avant chaque cycle (M1).

En 1973 l'engrais apporté sur les cuves est un engrais marqué par 5 ou 10 % d'azote 15. Dans tous les percolats supérieurs à 1 litre (3 mm de pluie) sont quantifiées les teneurs en ions dont N-NH4 - N-NO3 - . On analyse l'azote total des percolats (dosage de N- organique) sur un certain nombre de percolats prélevés périodiquement. L'enrichissement en N-15 est alors déterminé.

D'autre part, à la fin de chaque culture, on prélève des plantes qui sont pesées et analysées et des échantillons de sol dans l'horizon labouré. La détermination des teneurs en N-15 permet d'effectuer un bilan complet de l'azote engrais dans le système défini par les cuves lysimétriques.

3.3.2. Résultats.

A - Bouaké : (voir annexe tableaux 9 - 10).

1973 : la pluviométrie est de 959 mm
les 8 cuves de 45 cm ont drainé 300 mm
les 2 cuves de 80 cm ont drainé 350 mm
les pertes d'azote essentiellement sous forme nitrique sont de (résultats ramenés en kg/ha).

à 45 cm. N en unité	N1 + 60 u.	N2 + 120u.
Mo	58	62
M1	54	80
Moy.	56	71

à 80 cm	N1 + 60 u.
Mo	48
M1	54
Moy.	51

L'analyse de l'azote marqué dans ces percolats permet de calculer la part d'azote qui vient de l'engrais (tableau n° 10).

Il apparait que les pertes directes de l'azote provenant de l'engrais sont faibles :

1 % de 60 unités apportées
4 % de 120 unités.

- Les drainages sont peu nombreux et répartis sur deux périodes distinctes :

la première période correspond à une lixiviation d'environ 40 unités des nitrates présents dans le sol nu avant culture. L'onde de concentration maximum apparaît en Mai à des profondeurs respectives de 45 cm et 80 cm des pluviosités équivalentes de 60 mm et de 150 mm.

la deuxième période correspond à la lixiviation de l'azote pendant la culture, vers fin Août à 45 cm et début Septembre à 80 cm. Ces pertes sont de 25 unités environ.

Les enrichissements des eaux de drainage (tableau n° 10) passent par des valeurs maxima du 5 au 13 Septembre sur les cuves de 45 cm (D = 175 mm) et sur les cuves de 80 cm, les derniers percolats s'arrêtent avec des enrichissements maxima (D = 220 mm).

Le déplacement vertical de l'azote dans ce type de sol peut donc être évalué en fonction du volume d'eau drainé et en considérant la vitesse de déplacement constante à :

Couche 0-45 cm : 0,25 cm par mm d'eau percolante

Couche 0-80 cm : 0,36 cm par mm d'eau percolante.

1974 : la pluviométrie est de 1213 mm

les 8 cuves de 45 cm ont drainé 355 mm

les 2 cuves de 80 cm ont drainé 340 mm.

- eau utile sur le maïs 282 mm (pluie - drainage)
- eau utile sur le coton 390 mm.

Les pertes moyennes d'azote sous maïs et coton dans la tranche de sol 0-45 cm de profondeur sont :

Fertilisation cumulée :	N1	N2	
	160 u.	320 u.	Moy.
Mo	63	110	86
M1	51	89	70
Moy.	57	99	

Les pertes sont moins importantes à 80 cm qu'à 45 cm pour le traitement N1 (160 u.).

sous 45 cm = 57 u.
sous 80 cm = 40 u.

La teneur maximum en nitrate se situe mi-Septembre avec une autre période de fortes teneurs en Mai. Les volumes d'eau drainés correspondants sont respectivement de 220 mm et de 100 mm.

On retrouve les valeurs de la vitesse de déplacement vertical de l'azote citées ci-dessus pour 1973.

Les pertes d'azote marqué résiduel provenant de l'épandage d'engrais de 1973 sont faibles :

3 % de 60 u.] à 45 cm.
3 % de 120 u.]

1.4 % de 60 u. à 80 cm.

Quantités et pourcentage de N-15 drainés par traitement.

	M1N1	MoN1	M1N2	MoN2	M1N1	MoN1
QN 15	2.5	3.4	4.9	6.6	1.4	1.2
Pertes % de Q ajoutée	2.7	3.7	2.7	3.6	1.5	1.3

Conclusions relatives aux lysimètres de Bouaké :

Les pertes d'azote par lixiviation sont élevées sur les 45 cm de sol, avec une fertilisation normale, elles sont de l'ordre de 60 unités par an. Le cycle unique de riz favorise la perte d'azote avant la mise en place tardive de la culture.

Les pertes à 80 cm sont plus faibles et de l'ordre de 40 à 50 unités.

Cet azote semble provenir essentiellement de la minéralisation de l'azote du sol. On trouve en effet des pertes du même ordre à ces profondeurs sous une savane naturelle non fertilisée.

Les pertes par lixiviation de l'engrais apporté au sol sont très faibles. Sur deux années de drainage, elles sont estimées à 3 u. pour un apport de 60 u. et à 10 u. pour un apport de 120 u. à une profondeur de 45 cm et elles sont plus faibles à 80 cm.

Cet azote engrais a été peu utilisé par la culture en place mais fortement réorganisé au sein de la matière organique. Il a favorisé et stimulé également la minéralisation de l'azote du sol.

L'engrais que l'on apporte à la culture n'est donc pas ou peu perdu par lixiviation, bien que l'azote apporté en début de culture reste en partie sous forme minérale dans le sol pendant près de deux mois.

La lixiviation joue surtout sur l'azote qui est minéralisé dans le sol en début de saison des pluies avant la culture puis pendant celle-ci.

B - Gagnoa :

1973 : pluviométrie 1500 mm

drainage sous 80 cm = 500 mm

pertes annuelles d'azote pour 200 u. apportées sur 2 cycles de maïs (M1 = 130 u.
(Mo = 110 u.

Les pertes sont réparties à peu près également sur les deux cycles.

La lixiviation des éléments et notamment de l'azote se produit avec le passage d'une lame d'eau percolante de 160 mm soit une vitesse de transfert de 0,50 cm par mm.

Les teneurs maxima en azote se situent début Mai, début Septembre et début Novembre. Les pertes importantes ont lieu en Mars-Avril, Juin et surtout Septembre.

La perte d'azote-engrais apporté sur le premier cycle est très nette en Septembre, il s'agit cependant de pertes faibles représentant environ 4 % de l'azote engrais apporté. L'enfouissement n'a pas d'effet très net sur cette lixiviation.

1974 : pluie annuelle = 1340 mm

drainage = 380 mm.

La plus grosse partie des pertes a eu lieu pendant le premier cycle pendant lequel le drainage a été de 270 mm.

Les intensités maxima de drainage ont eu lieu en Mars, Juin et Octobre.

Les teneurs maxima des eaux de drainage en azote sont apparues vers la fin Avril - début Mai et en Octobre - Novembre. Ces maxima sont atteints par le passage d'une lame d'eau percolante de 150 mmenviron soit une vitesse de transfert de 0,54 cm/mm.

Pertes pour 200 u. apportées sur 2 cycles : (Mo = 160 u.
(M1 = 157 u.

Les pertes d'azote engrais résiduel provenant de l'apport d'azote-engrais sur le premier cycle 1973 (100u.) sont de l'ordre de 6 % de la quantité initiale, soit légèrement plus que l'année de l'application. L'enrichissement maximum se situe vers Mars-Avril.

Conclusion sur Gagnoa :

Les pertes d'azote sont importantes, sous 80 cm de sol. Cependant les pertes d'engrais sont faibles, (10 % de 100u. apportées, en deux ans de drainage).

L'enfouissement de paille n'a pas un effet très net sur cette lixiviation de l'azote. Il tend cependant à minimiser les pertes.

La vitesse de descente du front nitrique dans ce type de sol est de l'ordre de 0,5 cm par mm d'eau drainant. Il s'avère donc que le drainage de l'année qui est supérieur à 300 mm lessive totalement les nitrates présents dans la couche superficielle en début de culture. L'azote engrais apporté à ce moment est cependant peu lessivé car sa réorganisation au sein de la matière organique est rapide ainsi que son absorption par la culture.

C - Conclusion sur la lixiviation.

Les pertes d'azote sont importantes sous des cultures fertilisées = 50 u. à Bouaké, 140u. à Gagnoa en moyenne dans les deux systèmes.

Cet azote ne provient qu'en faible part de l'azote-engrais que l'on apporte sur la culture en place, il provient essentiellement de l'azote minéralisé dans la couche supérieure du sol qui est lessivé à des vitesses de l'ordre de 0,3 cm par mm d'eau percolée à Bouaké et 0,5 à Gagnoa.

Ces différences sont à relier aux différences entre les climats et entre les types de matière organique des sols.

A Bouaké, les pluies sont moins abondantes et la matière organique est plus polymérisée. L'azote est moins mobile.
A Gagnoa, les pluies sont plus percolantes et l'azote organique est plus mobile car moins lié à des formes organiques stables.

Un calcul met en évidence que l'azote de l'engrais et l'azote du sol se comportent différemment.

Par exemple à Gagnoa, les données sont :

apport = 120u. réorganisation = 60u. drainage = 10u. soit 17 % de 60.

Si l'azote drainé en provenance du sol l'était dans la même proportion, la quantité minéralisée serait de $\frac{130}{17}$ = 760 u. ce qui est peu vraisemblable.

Il faut donc admettre que la minéralisation lente mais continue de l'azote du sol favorise beaucoup plus les pertes qu'un apport relativement important d'azote-engrais. Celui-ci est rapidement réorganisé et mobilisé et échappe donc au drainage, mais comme il stimule la minéralisation, il accroît indirectement les pertes par lixiviation.

Au point de vue pratique, on peut faire les remarques suivantes :

L'azote minéralisé après la reprise des pluies vers le mois de Mars est pratiquement perdu par lixiviation en Septembre. A Gagnoa, les fortes pluies qui se prolongent jusqu'en Novembre favorisent la lixiviation de l'azote minéralisé en Août, après la petite saison sèche. L'enfouissement de la paille dans le sol ne semble avoir qu'un très léger effet sur ces pertes.

L'occupation du sol par une culture mise en place aux premières pluies devrait être favorable à la diminution de ces pertes importantes de début de cycle.

Si l'on est amené à ne réaliser qu'un cycle annuel, comme c'est le cas à Bouaké, il conviendrait alors de maintenir en place le tapis de plantes adventices jusqu'au moment de la mise en place de la culture. Les labours précoces sont à déconseiller.

Les pertes qui ont lieu pendant le cycle ne peuvent être limitées que par un apport approprié d'engrais (quantité et date) ou par l'emploi d'inhibiteur de nitrification qui empêcheraient la formation de grandes quantités d'azote minéral dans le sol.

3.4. UTILISATION DE L'AZOTE PAR LA CULTURE ET REPARTITION DANS LA PLANTE.

3.4.1. Généralités sur l'utilisation d'azote par une culture.

- Les plantes, comme tous les organismes, demandent de grosses quantités d'azote pour leur développement et leur reproduction. Cet azote rentre dans la constitution de l'ADN, d'enzymes, de produits métaboliques et de protéïnes. L'azote est l'élément constitutif principal, venant après l'hydrogène, le carbone et l'oxygène.

Une carence en azote provoque une baisse de la synthèse chlorophyllienne qui limite les rendements et réduit la qualité.

La couleur vert-pâle à vert-jaunâtre est un diagnostic bien connu de cette carence en azote.

Les effets d'excès en azote sont moins grâves que ceux de la carence, mais il peut y avoir également réduction des rendements résultant d'une compétition accrue des plantes pour la lumière, l'eau et les autres éléments nutritifs.

Les plantes que nous étudions puisent l'azote dans le sol par l'intermédiaire de leur système racinaire.

- Dans la suite de ce chapitre, le fait que la plante absorbe l'azote du sol est considéré comme une mobilisation par la plante et nous employerons le terme de "mobilisation de l'azote par une culture" pour parler de l'azote relatif au compartiment plante, par distinction avec l'azote minéral du sol qui peut être réorganisé ou immobilisé au sein de la matière organique.

- L'absorption de cet azote par la culture n'est pas continue tout au long du cycle et les vitesses d'absorption ne sont pas constantes : les besoins d'azote sont maxima à certains stades de la culture.

- Enfin, la fertilisation azotée appliquée sur la culture permet une mobilisation plus importante et donc de meilleurs rendements. Il s'agit alors de déterminer la fumure azotée pour que l'efficience de l'engrais soit la meilleure. Cette efficacité des engrais est traditionnellement représentée par les coefficients d'utilisation, bien que ceci soit discutable comme peuvent le montrer certains résultats.

En effet l'utilisation directe de l'engrais peut être faible, mais l'effet de la fumure peut être important grâce à un effet indirect de stimulation de la minéralisation de la matière organique du sol qui accroît également la mobilisation par la plante.

Nous comparerons dans l'étude les valeurs trouvées de ces différents coefficients.

Nous distinguerons classiquement les représentations suivantes :

* Coefficient d'utilisation apparent :

$$Ca = \frac{Pn - Po}{F}$$

Pn = Azote prélevé par la culture, par le traitement fumé (F).

Po = Azote prélevé par le témoin sans azote

F = fumure appliquée

* Coefficient d'utilisation réel (il est déterminé grâce à l'utilisation marqué N-15).

$$Cr = \frac{Pn \times E}{F \times Eo}$$

E = excès isotopique dans la plante

Eo = excès isotopique de l'engrais

* Contribution de l'engrais :

$$Kf = \frac{E}{Eo}$$

Elle représente la proportion de N prélevée par la culture en provenance de l'engrais.

Cette contribution varie selon la capacité du sol à fournir de l'azote.

La contribution du sol à l'alimentation de la plante est représentée par le complément à la contribution de l'engrais.

$$Ks = 1 - Kf.$$

3.4.2. Matériel et Méthodes.

Nous avons suivi les mobilisations de l'azote par un certain nombre de cultures sur les essais de fertilisation azotée. Certaines de ces études ont été faites avec l'utilisation d'engrais marqué, ce qui permet de déterminer le coefficient d'utilisation réel de l'engrais azoté par la culture.

Parmi celles-ci, citons :

- mobilisation de l'azote par le riz pluvial et utilisation de l'engrais pendant le cycle cultural - Bouaké 1973.
- mobilisation de l'azote et utilisation de l'engrais pendant le cycle cultural du maïs - Bouaké 1er cycle 1974.
- mobilisation de l'azote par le maïs - Gagnoa 1974.

De plus les mobilisations par des cultures en vases ont été également déterminées dans des essais complémentaires à ceux du champ :

- riz pluvial cultivé dans des essais en pots
- ray-grass cultivé en petits pots (chapitre précédent).

Essai "Azote-Paille" Bouaké.

Résultats agronomiques obtenus au champ (1973-1974).

	MoNo	MoN1	MoN2	M1No	M1N1	M1N2	Effet
Riz 1973 :							
Paille t/ha	3,00	3,75	5,66	4,44	5,03	5,06	N = HS M = NS
Grain t/ha	1,06	1,16	1,00	1,43	1,42	0,88	N = HS M = NS
Nbre grains/m2 en 10^4	3,81	4,48	4,23	5,00	5,16	3,43	N = HS M = NS
Grain/paille	0,35	0,31	0,17	0,32	0,27	0,17	N = HS M = NS
Maïs 1974 :							
Grain	3,2	4,8	4,2	4,0	5,2	4,5	N = HS M = S
Paille	4,6.	5,4	5,4	5,3	6,1	6,5	N = HS M = HS
Grain/paille	0,69	0,88	0,77	0,75	0,85	0,69	
Coton 1974 :							
M.S.à floraison t/ha	2,8	4,97	5,65	2,52	4,32	5,21	N = HS M = NS
Récolte grain t/ha	0,66	0,92	0,72	0,77	0,87	0,67	N = HS M = NS
Récolte tige	3,48	5,37	3,46	4,34	4,62	3,54	N = HS M = NS
Hauteur tige m	1,26	1,58	1,63	1,31	1,53	1,65	N = HS M = NS

Effet (Effet N = effet Azote
(" M = " matière organique

Différence entre traitements
NS = statistiquement non significatif
S = " significatif
HS = " hautement significatif.

Les protocoles des essais de fertilisation azoté ont été donnés auparavant.

La méthode employée est basée sur le même principe dans chaque cas. On apporte une quantité connue d'engrais marqué sur une petite parcelle cultivée, à une date déterminée. Par des prélèvements de plantespendant le cycle ou simplement à la récolte, on détermine les mobilisations d'azote et la proportion d'azote qui provient de l'engrais marqué. On peut calculer la quantité d'azote mobilisée par la plante et les coefficients d'utilisation apparent et réel de l'engrais azoté que l'on a apporté en comparant les mobilisations sur les parcelles témoins non fumées et celles sur les parcelles fumées.

3.4.3. Résultats.

A - Essai "azote x paille" de Bouaké.

a) Cas du riz pluvial.

Mobilisation de l'azote par le riz.

La fertilisation azotée permet d'augmenter le rendement en matière sèche et la mobilisation d'azote par la culture. Cette action est visible à la récolte mais encore plus au stade floraison qui correspond au stade de mobilisation maximum.

Quantités mobilisées : (figure n° 23)

+ Quantités d'azote mobilisées à la récolte en fonction des traitements (fig. n°2 3, tableaux N° 11 - 12 - 13 - 14 - 15).

en kg/ha	No	N1	N2
Mo	39	60	85
M1	58	76	73
Moy.	48	68	79

Coefficient apparent d'utilisation à la récolte.

N1	N2
33 %	25 %

+ Quantités d'azote maximum mobilisées en fonction des traitements au stade épiaison.

en kg/ha	No	N1	N2
Mo	54	103	133
M1	61	104	146
Moy.	57	103	139

Coefficient apparent d'utilisation maximum.

N1	N2
76 %	68%

Les grandes différences observées entre ces deux stades sont explicables par les conditions de sécheresses qu'a subi la culture et qui ont limité les rendements en paddy et donc les mobilisations d'azote par la récolte. La fertilisation azotée n'a pas permis les augmentations de rendements qui auraient dû avoir lieu dans de bonnes conditions climatiques.

On remarque qu'à partir de fin Septembre il y a une diminution des quantités d'azote mobilisées par le riz.

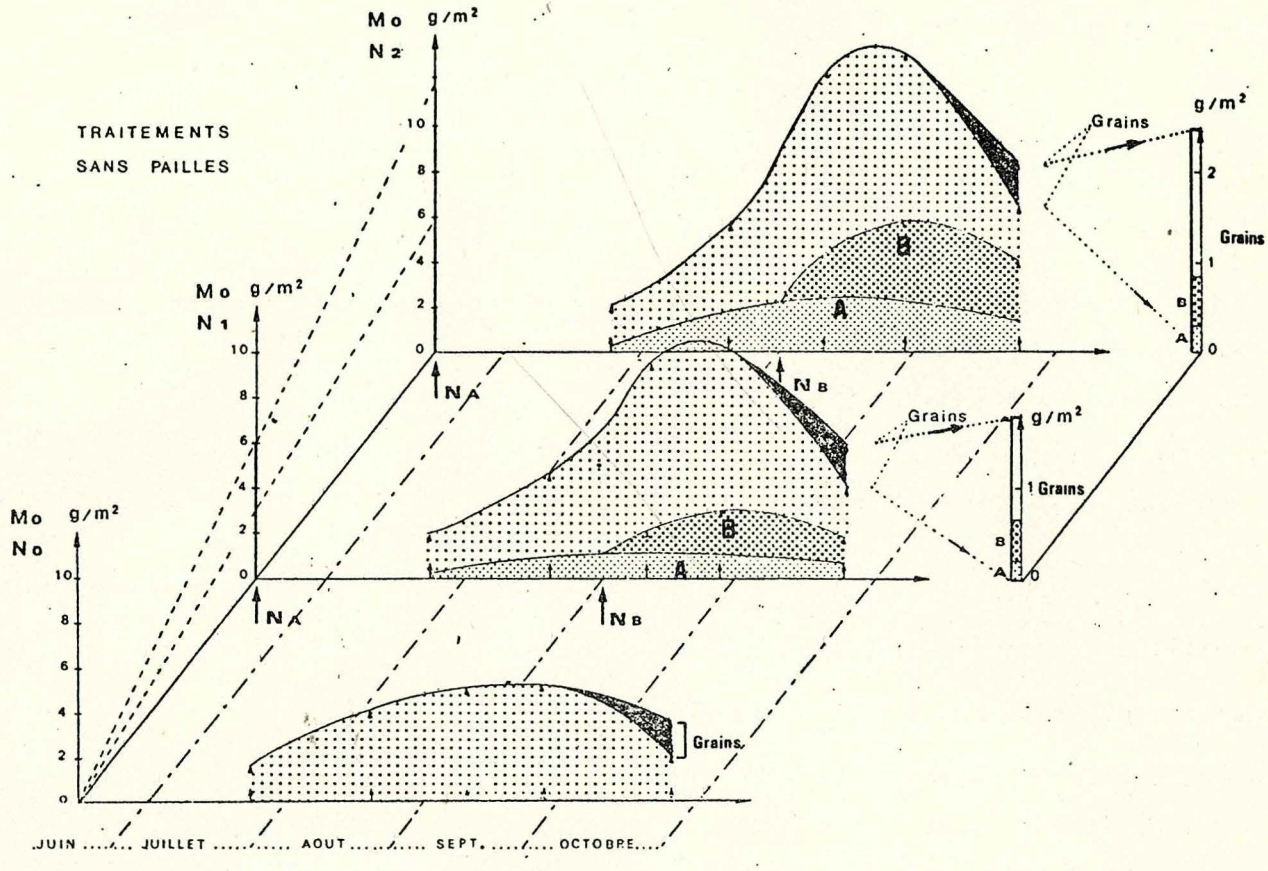
Cette diminution peut s'expliquer des différentes façons suivantes :

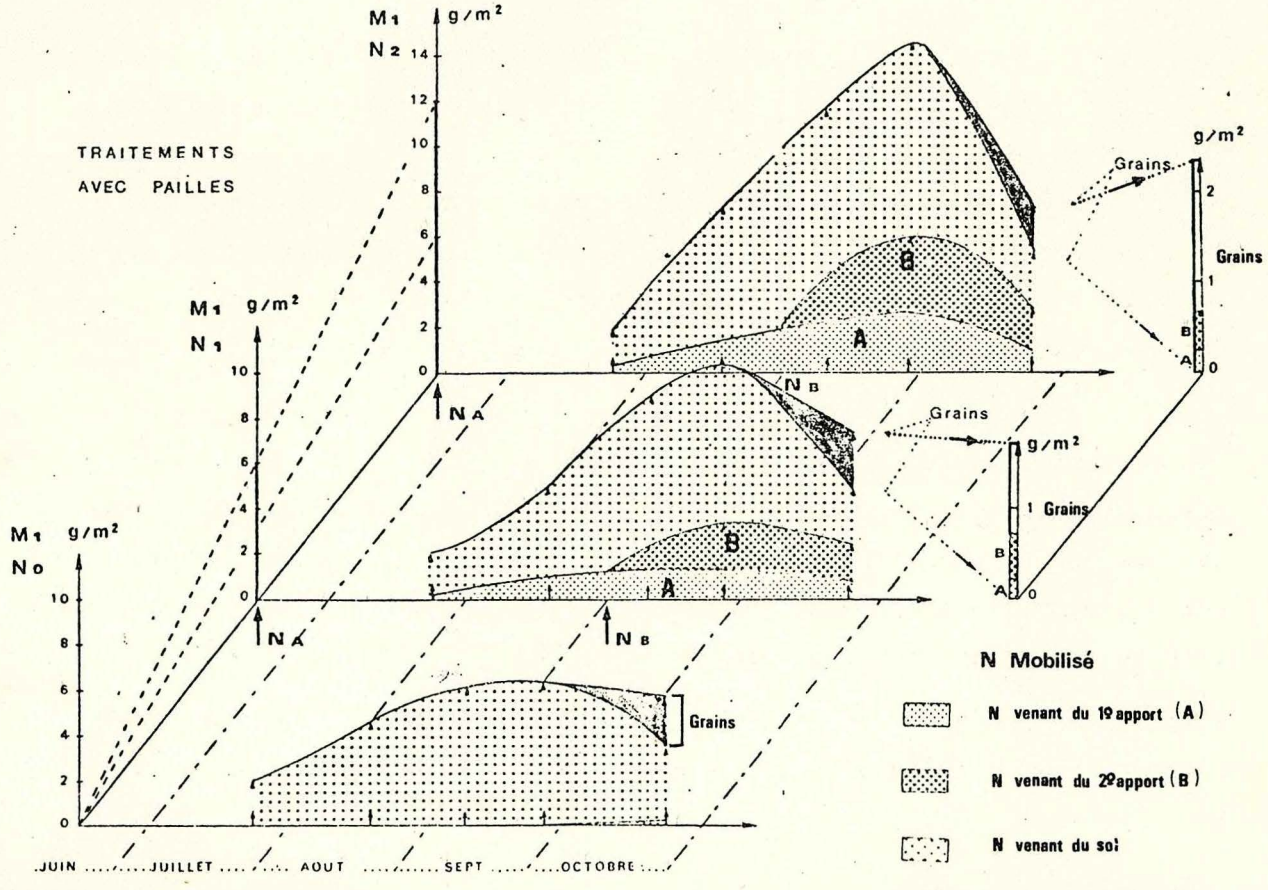
- Une partie de la matière sèche tombe sur le sol, cette matière sèche n'a pu être estimée dans l'essai au champ, mais une perte si importante uniquement de cette manière est peu vraisemblable.
- Les organes supérieurs perdent de l'azote par "respiration des protéïnes" ou protéolyse qui serait la réaction inverse de la réaction de synthèse. (KESSHER 1964/SHAH et LOONIS 1965/BEN ZOIDI - ITAI 1967/TANAKA 1973). Une déficience de source d'énergie par déficit de photosynthèse est dûe à la sécheresse. Les feuilles ne photosynthétisent plus mais respirent toujours et plus elles sont riches en azote et plus la respiration est forte. Lorsqu'il n'y a plus de substrats de photosynthèse disponibles, la protéolyse sert de source d'énergie pour la respiration.
- Les parties supérieures perdent de l'azote par une translocation des acides aminés dans les organes souterrains. Ce flux d'azote semblerait vérifié par la légère augmentation de l'azote minéral marqué dans le sol à partir d'Octobre, car cette augmentation est à mettre en parallèle avec la diminution observée dans les parties aériennes.

Il est probable que ces trois phénomènes qui ont eu lieu en même temps ont participé à cette diminution de la mobilisation de l'azote par le riz.

MOBILISATIONS TOTALES d'AZOTE.
et UTILISATION de l'ENGRAIS
par le RIZ PLUVIAL
var. Iguape Cateto

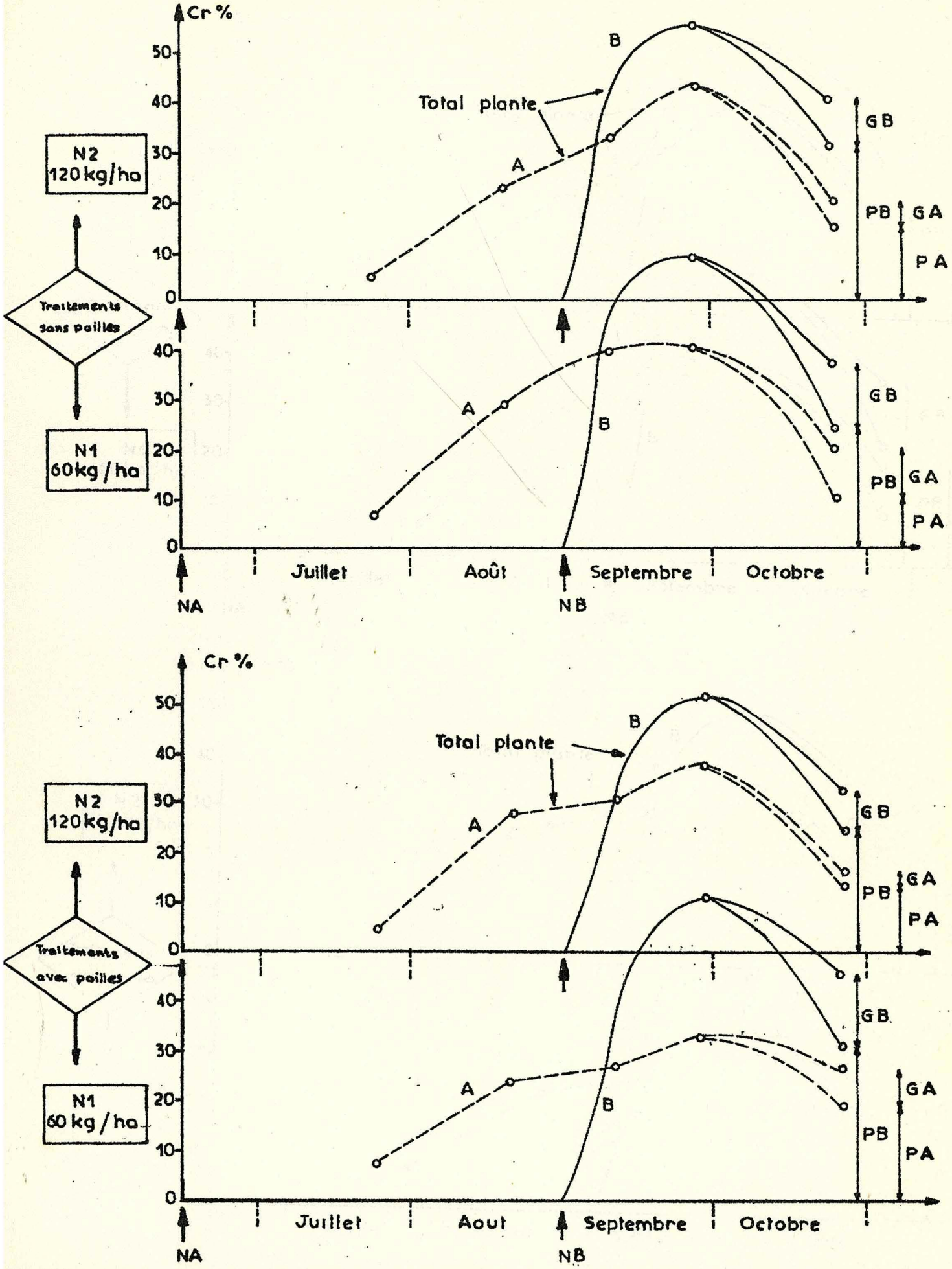
Station Agronomique de
BOUAKÉ - COTE D'IVOIRE
I.R.A.T.





COEFFICIENTS d'UTILISATION de l'AZOTE ENGRAIS par le RIZ PLUVIAL
(Cr %)

Fig n°24



G : Cr % par les grains	P : Cr % par la paille	A : Cr % apport semis	B : Cr % apport floraison

Utilisation de l'engrais par la plante.

(Fig. n° 24 - Tableau n° 14.

Les valeurs des coefficients d'utilisation de l'engrais par le riz passent par un maximum au début de maturation (voir courbes n° 6) et diminuent à la récolte.

	Maxi.	à la récolte
1er apport	35 - 40%	15 - 25 %
2ème apport	50 - 55%	30 - 40 %

Cette baisse des coefficients d'utilisation suit la baisse générale des quantités d'azote prélevées par la culture pendant la maturation du riz. La fertilisation azotée améliore également la qualité nutritionnelle du grain en augmentant la teneur en azote et donc en protéïnes.

Pour { No = 1,27 % de N soit 7,93%de protéïnes
{ N2 = 1,80 % de N soit 11,25% de protéïnes

Vitesse d'absorption de l'azote.

La quantité d'azote que peut fournir le sol non fertilisé au riz est de l'ordre de 60 unités avec un flux instantané relativement faible d'environ 1 kg/ha/j. calculé d'après la pente de la courbe de mobilisation.
L'engrais azoté augmente le flux instantané d'absorption de l'azote par la plante.

Pour 60 u. V = 2,1 kg/ha/j.
Pour 120 u. V = 2,8 kg/ha/j.

Ces valeurs maxima sont atteintes lors de la phase montaison - floraison, c'est-à-dire de mi-Août à fin Septembre pour la culture étudiée. En Septembre, la vitesse d'absorption de l'azote apporté au semis ne dépasse pas 0,3 kg/ha/j. alors que celle de l'azote du 2ème apport 1 kg/ha/j..

D'après la répartition de l'azote marqué dans la plante on voit que la culture a beaucoup mieux utilisé l'azote du 2ème apport que celui du 1er. Ceci est remarquable surtout dans les grains où il y a deux fois plus d'azote provenant du 2ème apport que d'azote du 1er apport.

Jusqu'au stade début maturation, l'enfouissement de paille a un léger effet dépressif sur l'utilisation du premier apport d'engrais. Mais par contre la paille enfouie semble fournir environ 15 kg/ha d'azote à la culture. Ceci est net surtout sur le riz non fertilisé.

La contribution de l'engrais à l'alimentation azotée du riz (tableau n° 8-4), c'est-à-dire la part que prend l'engrais dans la mobilisation de l'azote, passe également par un maximum qui se situe au début de la montaison pour le premier apport. Cette contribution de l'engrais diminue jusqu'à la maturation complète. Il y a donc un effet de dilution de l'azote du deuxième apport d'engrais par l'azote du sol pendant la maturation de la plante. Ce qui est manifeste vu la forte absorption du 2ème apport d'engrais par la plante.

Pour le deuxième apport, la valeur de la contribution atteint une valeur maximum le 28-9 et reste constante jusqu'à la récolte, ce qui prouve qu'il n'y a plus ou peu d'échange d'azote entre la plante et le sol pendant la phase maturation. La contribution de cet apport de couverture à l'azote des grains est supérieure à celle de la paille. Cet azote du 2ème apport d'engrais est utilisé en majeure partie par la plante pour la formation des protéïnes du grain.

L'utilisation du deuxième apport d'azote réalisé au stade montaison étant bien meilleure que celle du premier, surtout son utilisation par les grains, il faudra préconiser au niveau du développement un renforcement du deuxième apport par rapport au premier. Pour de faibles doses, la deuxième date d'apport serait seule recommandable si le sol est assez riche en azote pour permettre un départ suffisant de végétation, ce qui est le cas général.

b) Cas du maïs.

Mobilisation de l'azote par le maïs (voir schéma n° 25 et 26 - tableaux n° 16 - 17- 18).

Quantité d'azote mobilisée en fonction des traitements : kg/ha à la récolte.

	No	N1	N2
Mo	58	123	126
M1	75	132	146
Moy.	66	127	136

La fertilisation azotée permet d'augmenter considérablement la mobilisation d'azote par la culture.

Le coefficient apparent d'utilisation de l'engrais est de 60 % pour N1 et de 35 % pour N2.

Il s'avère que la dose N1 (100 u.) augmente sensiblement les quantités d'azote mobilisées par la culture ainsi que les rendements, mais que la dose N2 (200 u.) n'augmente pas beaucoup la mobilisation et fait diminuer légèrement les rendements.

Cet effet dépressif de la forte dose d'azote peut être expliqué par les mauvaises conditions hydriques qui n'ont pas permis au maïs d'exprimer son potentiel de rendement qui est le double du rendement produit.

L'apport de 200 unités a par contre un effet positif sur la qualité protéïque des grains puis qu'on passe de 1,30 % d'azote dans les grains du maïs non fertilisé à 1,75 % pour N1 et à 1,85 % pour N2.

Vitesse d'absorption de l'azote.

La quantité d'azote que peut prélever le maïs dans le sol non fertilisé, dans les conditions de l'année, est de 60 unités avec un flux instantané assez faible et constant, au long du cycle, de l'ordre de 0,5 kg/ha/jour.

L'engrais azoté augmente favorablement le flux d'absorption de l'azote par la plante.

Pour { 100 u. = 1,1 kg/ha/jour
{ 200 u. = 1,2 kg/ha/jour

L'absorption semble plus rapide sur les traitements fertilisés au début du cycle et on note en général un ralentissement après le 45ème jour.

La valeur maximum de la mobilisation est atteinte à la maturité où environ 70 % de l'azote de la plante est mobilisé par les grains.

L'enfouissement de paille semble fournir à la culture environ 10 à 15 kg/ha d'azote. Ceci est très net sur tous les traitements.

Utilisation de l'engrais par la plante.

Les valeurs des coefficients d'utilisation de l'engrais par le maïs, sont maximales à la maturité complète.

Coefficients d'utilisation : (schéma n° 26)

	N1	N2
1er apport	44 %	38 %
2ème apport	44 %	20 %

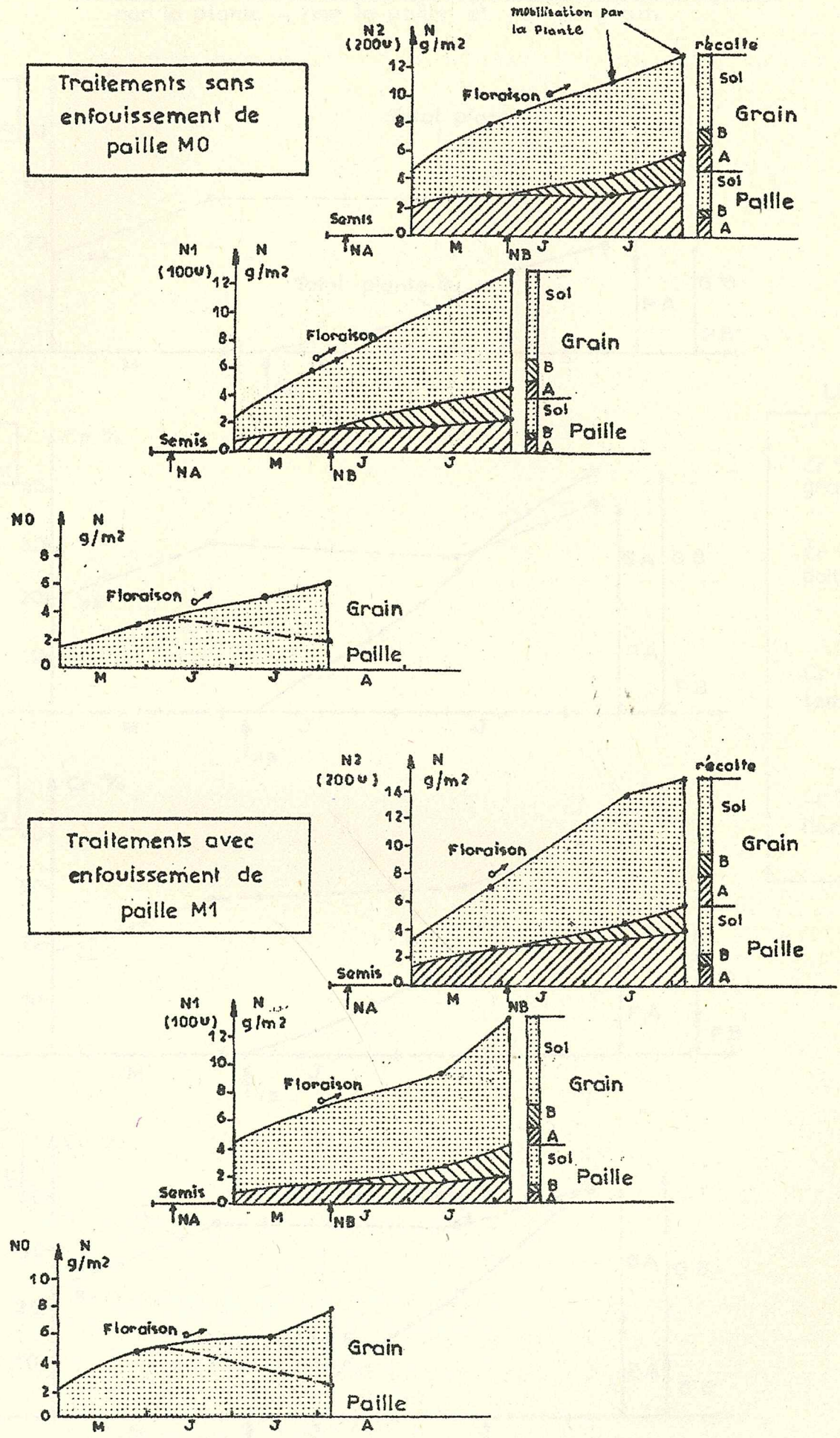
Le premier apport est utilisé à environ 40 % par le maïs pour les doses d'engrais N1 et N2. La réponse à l'azote de la culture est donc très nette au début du cycle. On s'aperçoit que l'absorption de l'azote du 1er épandage par la plante doit se faire dans le premier mois, car après Mai l'augmentation de l'azote marqué est très faible. Cet azote se répartit proportionnellement à la quantité totale mobilisée par la paille et par le grain. On retrouve donc plus d'azote du 1er apport dans le grain que dans la paille puisque les mobilisations par le grain sont supérieures à celle par la paille.

Le deuxième apport de 50 unités sur les traitements N1 est correctement utilisé par le maïs (44 %). Cet apport est très intéressant, car il a lieu à un stade où le système végétatif est déjà en place et il profite donc principalement à la formation des grains : 35 % de l'apport est mobilisé par les grains à la récolte. On trouve donc plus d'azote du 2ème apport dans les grains que d'azote du premier apport pour ce traitement.

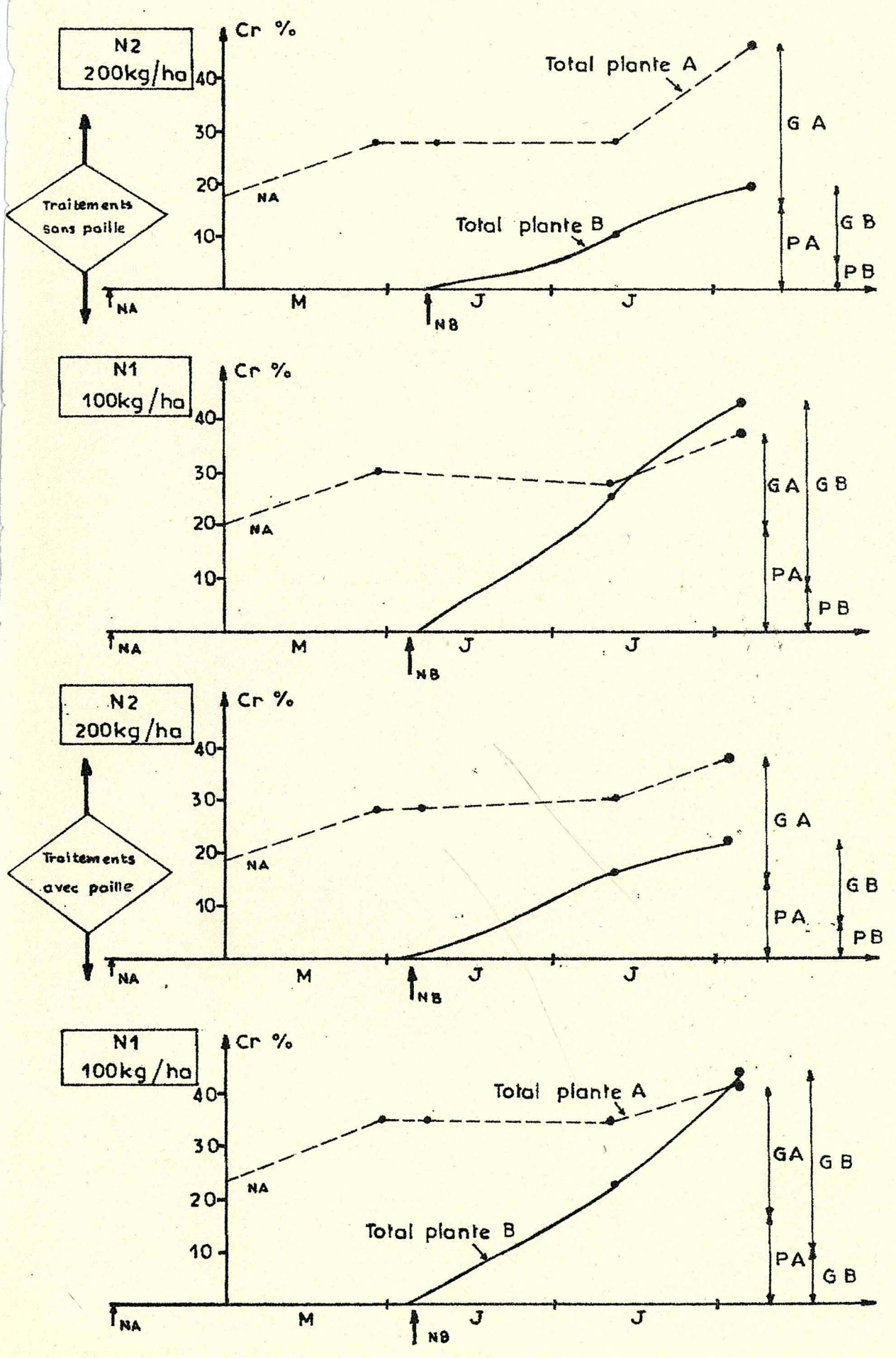
Ceci est confirmé par l'examen de l'évolution de la contribution de l'engrais à la nutrition azotée du maïs (tableau des valeurs K). Cette contribution est importante au début de cycle pour le 1er apport et diminue par la suite alors que la contribution du 2ème apport augmente jusqu'à la maturité.

Le deuxième apport de 100 unités sur les traitements N2 est très mal utilisé par le maïs (20 %). Le prélèvement n'est que de 20 kg/ha ; soit la même quantité prélevée par le maïs de N1 avec un apport de moitié. Cet azote sert également principalement à la formation des protéïnes du grain.

Mobilisations totales d'azote et utilisation de l'engrais par le maïs



Coefficients d'utilisation de l'azote - engrais par le maïs (Cr %)
par la plante - par la paille et par le grain



Dans les conditions de culture, ce deuxième apport est préjudiciable à la culture car l'augmentation de la quantité mobilisée et donc de la teneur dans la plante entraine une chute de la production. Ceci peut être expliqué par le déséquilibre entre la forte respiration des plantes très développées fortement fertilisées qui ont une photosynthèse limitée par les conditions du milieu.

Si l'on compare la mobilisation de l'azote engrais et la façon dont on l'a fourni à la culture, il n'y a pas de différence nette entre les quantités d'azote mobilisées par la plante que l'on apporte 100 unités en deux fois ou qu'on l'apporte en une seule fois au semis. Mais par contre, il est plus intéressant de les apporter en deux fois car la répartition de l'azote entre la paille et le grain n'est pas le même : on améliore l'utilisation de l'azote engrais par le grain au détriment de la paille lorsque l'apport est fractionné en deux épandages.

La vitesse d'absorption du deuxième apport d'engrais est élevée : 0,3 kg/ha /jour. Elle est la même pour les deux doses apportées, alors que la vitesse d'absorption du premier apport dépendait de la dose apportée :

0,33 kg/ha/jour pour 50 unités
0,55 kg/ha/jour pour 100 unités.

Notons enfin qu'il n'y a pas d'effet marqué de l'enfouissement de paille sur l'utilisation par la culture de l'azote apporté.

La conclusion pratique est qu'un apport de 100 unités d'azote à la culture était suffisant pour obtenir le plus fort rendement. L'apport de 200 u. a un effet dépressif. Il est plus intéressant d'apporter cet azote en deux fois, car l'azote amené à la floraison mâle sert principalement à la formation des protéïnes du grain. On préconisera donc au niveau du développement une fertilisation de ce type.

c) Arrière-effet de la fumure azotée.

1. Arrière-effet de la fumure du riz 73 sur le maïs 74 : (tableaux N°19-20-21.

Si l'on suit en arrière-action sur le maïs les parcelles qui ont reçu l'azote marqué pendant la culture du riz, la sous-parcelle A (sp) qui a reçu l'azote marqué au semis et sp B celle qui a reçu l'azote marqué à la montaison, on trouve une certaine quantité de cet azote marqué dans le maïs. Ceci nous permet de calculer un coefficient d'utilisation en arrière effet de la fumure azotée précédente (C_r).

Ce coefficient d'utilisation est voisin de 6 % avec une contribution de l'engrais à la nutrition azotée de la plante de l'ordre de 2 %.

Tableau des valeurs trouvées sur maïs de la répétition n° 5 de l'essai en 1974 :

(Cette répétition avait reçu de l'azote marqué à 10 % en 1973).

C_r = coefficient d'utilisation réel en arrière-action.

Kf = contribution de l'engrais en arrière-action.

	Sp A		Sp B	
	Cr %	Kf %	Cr %	Kf %
MoN1	6,1	1,5	7,5	1,8
MoN2	5,2	2,5	5,6	2,7
M1N1	7,5	1,7	7,4	1,8
M1N2	3,9	1,7	4,8	2

Il n'y a pas d'influence nette sur ces coefficients de la date d'apport de l'engrais azoté et des traitements doses d'apports et apport de paille.

A priori on pouvait penser que l'apport réalisé au semis, qui a été moins bien utilisé que l'apport réalisé à la montaison (pratiquement deux fois moins bien utilisé), aurait un arrière-effet plus marqué. Une grande partie de cet apport semble donc être passée sous forme non directement assimilable par la culture suivante. On peut estimer la non-utilisation du premier apport à 75 % et celle du deuxième à 50 % environ.

2. Arrière-effet de la fumure du maïs 1er cycle sur le coton 2ème cycle.

De la même façon que précédemment on a suivi en arrière-action les parcelles ayant reçu de l'engrais marqué en 1er cycle sur le deuxième cycle de coton. On trouve une certaine quantité d'azoté marqué dans le coton, ce qui permet de calculer un coefficient d'utilisation et une contribution de l'engrais en arrière-action.

Tableau de Cr% et Kf% en arrière-action.

(Valeurs moyennes trouvées sur les 6 répétitions de l'essai).

	Sp A		Sp B	
	C_r %	Kf %	C_r %	Kf %
MoN1	1	1,3	4	2,6
MoN2	2	2,5	4	4,0
M1N1	2	1,5	4	2,2
M1N2	2	2,3	5	5,6

L'utilisation de l'azote-engrais résiduel est très faible. Celle du 2ème apport est nettement meilleure que celle du 1er apport sur maïs, mais on ne voit pas de différence entre les doses N1 et N2 alors que les valeurs des coefficients d'utilisation par le maïs sont très distinctes pour ce 2ème apport : 44 % pour N1 et 20 % pour N2.

La contribution résiduelle de l'engrais est tout de même 2 fois plus importante pour N2 que pour N1.

Compte tenu de l'utilisation directe de l'engrais par le maïs de 20 % pour le deuxième épandage de 100 u. (N2) et de l'arrière-action très faible, on peut donc estimer la non-utilisation de l'engrais à 55 % environ pour N1 et à 70 % environ pour N2.

3. Discussion de la méthode.

La méthode des prélèvements en arrière-action donne des résultats par défaut. En effet la terre est déplacée entre les deux cultures par le labour et de ce fait la terre des sous-parcelles est perturbée et plus ou moins diluée avec celle n'ayant pas reçu d'azote marqué.

Les résultats montrent que la grande quantité d'azote engrais qui a été réorganisée dans le sol est disponible en partie pour les cultures suivantes par minéralisation de la matière organique. Cette minéralisation présente un coefficient de minéralisation supérieur à celui de l'azote du sol.

On peut donc avoir pendant un certain nombre de cultures successives une utilisation en arrière-effet de l'engrais apporté sur une culture. On aurait ainsi une suite des coefficients d'utilisation tendant vers une limite finie. Par exemple.

C_r1 = 50 % C_r2 = 10 % C_r3 = 5 % etc... avec $\sum C_r i$ tendant vers 70 %.

B - Essais de Gagnoa.

a) Essai "Paille-compost" - 1er cycle 1974.(Tableaux n°23-24-25-26.)

Le but de l'essai était de comparer l'effet de l'azote (N1) en présence ou non de paille (Mp) et de compost (Mc).

Les quantités de paille apportées sont de 10 t/ha et les quantités de compost correspondent au même poids de paille préhumifiée apportée sous forme de compost frais.

- L'effet de l'azote sur la culture n'est pas significatif sur les rendements en grain, mais il l'est sur les rendements en paille. L'enfouissement de paille n'a pas d'effet mais celui de compost a un effet, surtout sur la manière sèche totale produite.

L'apport d'azote (100 u.) était fait 25 jours après le semis sur le maïs.

Résultats à la récolte, l'efficience de l'engrais : utilisation réelle.

Trait.	Paille			Grain			Total plante	
	N %	Cr %	Kf %	N %	Cr %	Kf %	Cr %	Kf %
MoN1	0,56	11	5	1,45	26	25	37	30
MpN1	0,55	9	4	1,46	26	23	35	27
McN1	0,62	11	5	1,45	24	23	35	28

Les mobilisations totales d'azote par le maïs sont en kg/ha.

Mo		Mp		Mc		
No	N1	No	N1	No	N1	
86	99	62	104	111	120	Grain
18	26	20	23	25	44	Paille
103	125	85	128	136	164	Total
	22		43		28	Ca %.
5,8	6,0	6,0	6,1	6,5	6,7	Rendement en grain

On voit sur les mobilisations l'effet positif de l'engrais, l'effet dépressif de l'enfouissement de paille et l'effet très important du compost.

Si l'on compare les coefficients d'utilisation réels et apparents nous pouvons mettre en évidence les différences par le tableau suivant :

Coefficient d'utilisation	Mo	Mp	Mc
Ca- apparent	22	43	28
Cr- réel	37	35	35

Celles-ci reflètent les différentes quantités d'azote qui viennent du sol en fonction des traitements et qui sont = (en unités).

Mo		Mp		Mc	
No	N1	No	N1	No	N1
103	88	85	93	136	129

L'apport de 100 unités d'azote fait diminuer la part d'azote qui vient du sol et des matières organiques enfouies lorsque on l'apporte seul ou avec du compost, et au contraire stimule la minéralisation lorsqu'on l'apporte avec une importante quantité de paille enfouie.

Par contre les apports de matière organique influent sur les mobilisations totales, mais non sur l'utilisation de l'engrais par la culture.

b) Essai "azote-paille" 1er cycle 1974.

Tableaux N° 27-28-29-30.

Le but de l'essai est de mettre en évidence les effets d'apports de doses d'azote et de paille sur les rendements et la fertilité du sol à long terme.

L'azote est apporté en deux fois au semis et à 50 jours après le semis (JAS).

L'effet de l'azote est hautement significatif, les deux doses apportées 50 u. et 100 u. ont un effet équivalent.

L'effet de la paille n'est pas significatif sur les rendements en grain mais l'est sur celui en matière sèche.

Résultats sur l'utilisation de l'azote et l'efficience des engrais.

Mobilisation de l'azote et coefficient d'utilisation apparent :

	Mo			M1 (5 t/ha)			M2 (10 t/ha)		
	No	N1	N2	No	N1	N2	No	N1	N2
N-kg/ha									
Grain	69	88	90	72	80	86	56	84	85
Paille	21	32	37	19	31	29	21	31	31
Total	90	120	127	91	111	115	77	115	116
Ca %	--	60	37	--	40	24	--	76	38
Rdt. en grain t/ha	4,5	5,3	5,2	4,7	5,0	5,0	4,0	5,4	5,2

Coefficient d'utilisation réel de l'engrais sur les traitements Mo et M2 :

	Mo				M2			
	N1		N2		N1		N2	
Cr %	1er ap. 25 u.	2è ap. 25 u.	1er ap. 50 u.	2è ap. 50 u.	1er ap. 25 u.	2è ap. 25 u.	1er ap. 50 u.	2è ap. 50 u.
Paille	10,7	13,0	11,7	12,5	10,2	17,4	8,4	12,3
Grain	19,5	42,6	12,3	32,0	21,0	29,0	17,2	29,7
Total	30,2	55,6	24,0	44,5	31,2	46,4	25,6	42,0
Moy.	43		34		38,8		33,8	

Dans les meilleures conditions de culture, la quantité d'azote potentielle maximum mobilisable par le maïs à Gagnoa est de :

Paille = 0,6 % x 8 t/ha = 48
Grain = 1,6 % x 10 t/ha = 160
Total = 208 kg N/ha.

Le sol cultivé non fertilisé peut fournir environ 90 unités. Il reste donc environ 110 unités qui doivent être apportées par l'engrais. Il faudrait donc un coefficient d'utilisation de 100% de la dose N2 pour atteindre le maximum d'azote théoriquement mobilisable par la culture.

Dans les conditions de culture moyennes à Gagnoa, les disponibilités hydriques pour l'alimentation de la plante, ne permettent pas d'atteindre ce maximum. Pour cet essai, la mobilisation la plus forte obtenue est de 127 unités. Sur cette quantité, 93 unités proviennent du sol et 34 des 100 unités de l'engrais apportés. D'après l'utilisation réelle de l'engrais par la plante, le sol fournit bien environ 90 unités à la culture. Cette quantité baisse si une forte quantité de paille est enfouie au sol. Mais elle dépend de la dose d'azote apportée.

Quantité d'azote fournie par le sol à la culture en fonction des traitements = (en unités).

Mo			M2		
No	N1	N2	No	N1	N2
90	99	93	77	95	82

Ceci revient à faire la comparaison entre les coefficients d'utilisation apparents et réels.

	Mo		M2	
	N1	N2	N1	N2
C app. %	60	37	76	38
C réel %	43	34	39	34

L'apport d'engrais stimule la minéralisation de l'azote du sol et celle des matières organiques enfouies. Cet effet est plus net si la dose est inférieure au maximum de la fumure azotée.

On constate d'après les résultats obtenus que l'utilisation du 2ème apport d'azote fait en couverture est beaucoup plus efficace que le premier, si on se refère à l'utilisation réelle de l'engrais. Cette mobilisation est faite principalement par le grain car cet apport est réalisé au stade où la plante est déjà formée mais où ses besoins azotés sont élevés pour la formation des grains.

c) Essai "azote-compost" - 1974- 1er cycle.
Tableaux n° 31-32-33.

Le but de cet essai pluriannuel est de mettre en évidence le rôle spécifique de la matière organique préhumifiée sur l'évolution des sols et des rendements.

L'azote est apporté en deux fois avec des doses de 0 à 200 unités sur le maïs.

Ce premier cycle de la 4.ème année de culture fait apparaître que, comme les années précédentes, l'azote ne marque pas sur les rendements en grain. Son action est pourtant visible sur la matière sèche produite. Par contre le compost augmente les rendements de 20%. Cet effet du compost s'explique, entre autres facteurs, par l'amélioration de la nutrition en N, P et K. Il s'agit d'une amélioration de la quantité et de la qualité des produits disponibles apportés par le compost dans le sol.

Mobilisation de N en fonction des traitements.

N unités	Mo						M1 (40 t/ha de compost)					
Engrais	0-	40-	80-	120-	160	200	0-	40-	80-	120-	160	200
Grain	49	68	73	68	60	68	74	67	80	85	91	92
Paille	16	17	33	33	32	27	10	17	21	33	28	34
Total	65	85	106	101	92	95	84	84	101	118	119	116
Ca %	-	50	51	30	17	15	--	0	21	44	33	26
Rdt. en grain t/ha	4,0	5,1	5,0	4,6	4,2	4,6	5,4	5,1	5,5	5,9	6,0	5,3

L'apport de compost semble correspondre à un apport d'azote de 20u. pour la culture.

Un apport de 40u. d'engrais couvre la différence provenant de cet apport. Par contre cet apport améliore l'utilisation de l'engrais azoté, surtout pour la mobilisation de l'azote par les grains:quantité et qualité accrue - (augmentation de la teneur en protéïnes).

Coefficient d'utilisation réel.

Nous avons comparé simplement l'utilisation par la plante d'une quantité moyenne d'engrais azoté en présence ou en l'absence de compost.

	Mo N2 (80 u.)		M1 N2 (80 u.)	
Cr %	1er app.	2ème app.	1er ap.	2ème ap.
Grain	22	31	23	22
Paille	10	15	9	15
Total	32	46	32	37
Moy.	39		34	

Le premier apport d'azote est utilisé de la même façon qu'il y ait ou non du compost.

Le deuxième apport est mieux utilisé en l'absence de compost. Les quantités d'azote mobilisées par la culture qui ne proviennent pas de l'engrais varient en fonction des traitements :

Mo		M1	
No	N2	No	N2
65	75	84	74

Sur cet exemple, on voit que lorsqu'il n'y a pas d'apport d'engrais le compost fournit de l'azote à la culture = 19 unités . L'apport d'engrais stimule la minéralisation de l'azote du sol sur le traitement sans compost (10u.) mais inhibe la minéralisation du compost.

L'interaction du compost avec l'azote est donc complexe, le compost pouvant fournir de l'azote à la plante dans certaines conditions de teneur du sol en azote minéral.

D. Conclusion sur la culture du maïs à Gagnoa.

+ Dans les conditions de l'année la fumure azotée a peu amélioré les rendements en grain bien qu'elle ait fortement amélioré les mobilisations d'azote par la culture et donc la qualité des grains. De ce point de vue la dose économique se situe entre 50 et 100 unités et voisine de 50 u. Sur un sol nouvellement mis en culture après jachère, l'apport d'azote est inutile.

- l'apport de manière organique au sol influence peu l'utilisation réelle de l'azote engrais par la culture. Il y a cependant une interaction de l'engrais avec la matière organique enfouie.

+ L'apport d'azote avec de la paille enfouie stimule la minéralisation de l'azote du sol et de la paille. Cet effet est important si la dose d'engrais apportée n'est pas trop importante.

+ L'apport d'azote avec du compost, inhibe au contraire dans une certaine mesure la minéralisation de l'azote du compost. Ceci peut être expliqué par les fortes teneurs en azote minéral dans le sol de ces traitements, qui jouent un rôle inhibiteur de la minéralisation de l'azote organique.

- l'enfouissement de paille immobilise une partie de l'azote minéral du sol si il n'est pas accompagné d'un apport azoté. Dans le cas contraire, la minéralisation est stimulée et les mobilisations accrues.

- l'enfouissement du compost joue un rôle favorable sur les rendements. Ceci peut s'expliquer en partie par l'amélioration de la nutrition azotée, et en éléments P et K.

- les vitesses de mobilisation de l'azote par la culture dépendant du sol et des traitements subis. Si l'on considère la nutrition azotée constante jusqu'au 100ème jour pour le maïs, ces vitesses varient de 0,65 kg/ha/j. en sol non fertilisé à 1,2 kg/ha/jour en sol fertilisé.

- les coefficients d'utilisation de l'engrais apporté sont peu influencés par les apports de matière organique au sol. La présence de grande quantité de compost semble cependant freiner l'absorption de cet azote-engrais.

Ces coefficients d'utilisation réels de l'engrais sont faibles et se situent entre 35 et 40 % des quantités apportées.

L'apport d'azote en couverture à un stade tardif comme à la floraison mâle est beaucoup mieux utilisé par la culture que des apports plus précoces. De ce fait on conseillera pour cette culture une fertilisation azotée à ce stade de développement de la plante.

3.4.4. Conclusions sur la mobilisation de l'azote par la culture.

Dans les cas étudiés au champ dans les deux sites expérimentaux, il s'avère que la quantité moyenne d'azote que peut fournir à la culture un sol non fertilisé en équilibre et cultivé de façon intensive est de l'ordre de 60 u. à 90 u. par cycle lorsque le sol est encore "jeune".

La vitesse de transfert de cet azote à la plante n'est pas forcement continue pendant le cycle et dépend des facteurs du milieu et de la demande de la plante. La fertilisation azotée permet d'accroître cette vitesse d'absorption notamment aux périodes de demande instantanée élevée de la plante. Cette période est nette dans le cas du riz et moins bien déterminée dans le cas du maïs.

Ceci est peut être en corrélation avec le fait que le riz préfère la forme ammoniacale à la forme nitrique de l'azote minéral du sol. Pour cette culture, les mobilisations semblent passer par un maximum à la période floraison, ce phénomène a été vérifié sur d'autres céréales comme le blé en France (J.C. REMY 1975).

L'enfouissement de matière organique au sol peut apporter jusqu'à 20 u. à la culture. Cet enfouissement n'est pas préjudiciable à l'absorption directe de l'engrais par la plante.

Dans le cas où une restitution importante de paille n'est pas accompagnée d'un apport d'engrais, elle fait diminuer la mobilisation d'azote par la culture et donc les rendements.

La fertilisation azotée augmente non seulement les rendements si les autres conditions sont favorables, mais aussi la teneur en azote de chaque partie de la plante et plus spécialement celle des grains (augmentation de l'ordre de 50% de teneur en protéïnes).

Les mobilisations et les exportation sont donc très fortement dépendantes du facteur fertilisation du sol.

L'utilisation directe d'un apport de couverture pendant le cycle est bien meilleure que celle d'un apport réalisé au début du cycle. La mobilisation de cet azote s'opère principalement au bénéfice des grains.

Cependant un apport peu important réalisé au semis permet une stimulation de la minéralisation et donc un accroissement possible de la mobilisation de l'azote par la culture. Cet azote reste disponible en partie dans le sol pour la culture en place.

Dans le cas de la culture du riz, en cycle unique à Bouaké, il serait cependant plus rentable d'accentuer la fertilisation après la reprise des pluies en Août (stade montaison - épiaison).

Dans le cas du maïs, il semble également qu'il faille préconiser un apport de couverture vers le stade floraison mâle.

Dans les deux cas, les apports d'azote à réaliser sont de l'ordre d'une cinquantaine d'unités pour que ces apports puissent être rentabilisés par le surplus de production en conditions pluviales de culture. Etant donné l'irrégularité des pluies qui caractérise la région Centre, cette rentabilisation est aléatoire et n'a lieu que 2 années sur 3 environ.

3.4.5. Conclusions sur le transfert d'azote dans le système sol-plante.

- L'azote minéral présent dans le sol représente la principale source d'azote pour la culture. Il semble que le riz absorbe préférentiellement l'azote ammoniacal et le maïs l'azote nitrique.

  Cette absorption n'est pas toujours continue tout au long du cycle et il peut exister des maxima de vitesse d'absorption. Il faut alors qu'il ait équilibre entre l'offre et la demande, ce qui est réalisé dans le cas d'un apport d'azote-engrais. Sinon le sol ne peut suffire à la demande qui est largement supérieure à la capacité de minéralisation du sol dans des conditions normales de culture (en particulier lorsque l'alimentation en eau de la plante est bien assurée).

- Dans le cas d'un sol non fertilisé en azote, les vitesses de transfert entre le sol et la plante sont inférieures à 1 kg/ha/jour :

  * 0,5 à 0,65 kg/ha/jour dans le cas du maïs en considérant l'absorption comme linéaire pendant le cycle.

  * 1 kg/ha/jour comme vitesse maximum pendant le stade montaison du riz.

    La valeur de 1 kg/ha/jour correspond environ en tenant compte du poid de l'horizon humifère sur 1 ha à 0,33 ppm/jour d'azote minéral dans le sol.

    La minéralisation de l'azote du sol permet donc la fourniture à la culture pendant un certain temps de 0,33 ppm d'azote du sol par jour à partir de la réserve d'azote total du sol qui est de l'ordre de 1000 ppm.

* 60 kg d'azote minéral provenant du sol non fertilisé demandent une minéralisation minimum annuelle de 2 % de la quantité d'azote totale (NT) du sol. Si l'on tient compte des pertes possibles il faut pratiquement un coefficient de 3 à 4 % par an pour avoir 60 kg d'azote mobilisable par la culture.

- Dans le cas de fertilisation azotée, les vitesse de transfert atteignent au maximum 2,8 kg/ha/j. dans le cas du riz avec un apport de 120 unités, ce qui correspond environ à 1 ppm/jour dont 0,66 ppm est fourni par l'engrais.

  L'absorption maximum durant environ 40 jours, il faut donc 0,66 x 40 26 ppm d'azote-engrais, ce qui correspond à environ 75 unités d'azote engrais sur les 120 unités qui ont été apportées - (coefficient d'utilisation réel maximum 55 % pour N2 et coefficient apparent 68 %). On retrouve sur les courbes de dynamique des teneurs en azote minéral des différences de l'ordre de 45 ppm sur ce traitement entre le maximum et le minimum de teneur soit 140 unités environ, ce qui correspond bien à l'immobilisation maximum de la culture au stade épiaison.

  Une dizaine de ppm, soit 30 unités, restent disponibles dans le sol sous forme nitrique à cette époque ce qui montre que le riz, ayant des besoins importants à cette phase, n'est pas capable d'assimiler tout l'azote nitrique disponible dans le sol. Dans le cas du maïs, il y a très peu d'excédents d'azote minéral sur les traitements non fertilisés. Les différences de teneur d'azote minéral dans le sol entre les maxima et les minima donnent aussi une estimation des mobilisations par la culture.

- En résumé, on peut noter que la minéralisation de l'azote du sol pendant des temps relativement longs permet la fourniture à la culture d'une quantité maximum de 0,33 ppm d'azote par jour soit 1 kg/ha/jour. Si la demande instantanée par la culture dépasse cette quantité, la fertilisation azotée permet d'adapter l'offre à la demande. Les vitesses de transfert peuvent alors doubler, mais tout l'engrais ne participe pas à l'alimentation de la culture, une moitié au maximum dans nos conditions de culture.

  Cet apport d'engrais permet cependant une minéralisation accrue de l'azote du sol et donc une fourniture plus importante d'azote en provenance du sol à la culture.

3.5. ESSAI DE BILAN.

Un certain nombre de transferts de l'azote dans le système sol-plante a été étudié.

Nous avions dit dans notre préliminaire que pour différentes raisons, certains transferts n'étaient pas ou peu suivis dans notre expérimentation. De ce fait, il est impossible de réaliser un bilan exact de l'azote dans le système étudié.

Cependant des données bibliographiques peuvent nous donner l'ordre de grandeur des quantités d'azote qui sont en jeu. Nous pouvons ainsi tenter de réaliser un bilan approché de l'azote dans son cycle. D'autre part, grâce à l'emploi d'azote marqué comme engrais, il nous est parfaitement possible de réaliser un bilan de cet azote-engrais. Nous présenterons d'abord des données bibliographiques sur les données manquantes avant de réaliser ces bilans de l'azote.

3.5.1. Estimation des facteurs non étudiés.

A - Entrées dans le système.

1) Apport par les précipitations atmosphériques.

En basse Côte d'Ivoire, ROOSE et TALINEAU (1973) trouvent des apports de 21 kg d'azote par hectare et par an, dont 30% sont sous forme minérale. Les charges solubles élevées sont observées lors des petites pluies et en fin de saison sèche avec des pluies d'orage. La richesse chimique dépendrait surtout des poussières et des microorganismes en suspension dans l'air. JONES et BROMFIED (1970), sur plusieurs sites du Nigéria, trouvent des quantités d'azote minéral de l'ordre de 4,5 kg/ha/an avec un rapport N-NH4 sur N-NO3 de 1,26.

Nous pouvons retenir qu'il faut compter un apport atmosphérique pour une année de l'ordre de 20 unités, surtout sous forme organique.

2) Apport par fixation atmosphérique.

Beaucoup de travaux sont entrepris depuis quelques années dans le monde sur la fixation par les céréales car cette fixation biologique semble être un processus particulièrement intéressant sur le plan économique car susceptible d'être amélioré par certaines techniques.

Actuellement la méthode la plus employée pour estimer ce phénomène est la méthode de réduction de l'acétylène (KOCH et EVANS - 1966 - HARDY et KNIGHT 1967). Pour le maïs en milieu tropical, on a trouvé au Brésil que la fixation dépendait de la variété et de la lignée cultivée - (DOBEREINER 1972-1975). Pour certaines lignées, l'activité des bacteries en symbiose associative ont des taux de nitrogènase du même ordre que celle du rhizobium du soja. Ce qui veut dire que la fixation potentielle journalière maximum serait de l'ordre de 2 kg de N par hectare au stade floraison femelle. Elle permettrait donc de couvrir les besoins azotés de la culture soit 100 à 200 unités.

Pour le riz, on trouve peu de résultats. On peut citer ceux de RINAUDO (1970-1975) de BALANDREAU et DOMMERGUES (1971-1972) de FARES HAMAD (1973) de WATANABE (1975). Mais ces auteurs ont surtout étudié le riz dans des conditions de culture qui sont rarement pluviales strictes.

Il apparait que la fixation dépend également de plusieurs facteurs dont la fertilisation. Dans le cas du riz pluvial, il semble que la fixation serait de l'ordre de 10 à 30 unités selon les conditions du milieu.

B - Sorties du système.

1) Dénitrification biologique.

Généralités :

La réduction biologique du nitrate en des composés gazeux est une réduction effectuée par des agents microbiens anaérobies facultatifs. En l'absence d'oxygène, le nitrate est utilisé pour la respiration.

Bien que cette dénitrification soit un processus important du sol et connu depuis longtemps, son étude représente des difficultés expérimentales importantes.

L'utilisation de l'azote marqué est une des principales méthodes pour suivre ce phénomène. Nous citerons les travaux de WIJLER et DELWICHE (1954), de NOMNIK (1956) COOPER et SMITH (1963) de GUIRAUD (1968).

La plupart de ces auteurs s'accordent sur la séquence de réduction suivante:

$$NO_3 \rightarrow NO_2 \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$$

la proportion des gaz formés N2O et N2 dépdendant du pH.

Les hautes températures sont un facteur favorable. Ces pertes sont de deux catégories : les pertes rapides et importantes et celles impliquant de faibles quantités sur une longue période. Les premières surviennent quand les sols contenant du nitrate et de la matière organique facilement décomposable sont engorgés d'eau pendant un certain temps.

Dans les sols que nous étudions, nous avons donc plusieurs facteurs qui pourraient être favorables à la dénitrification biologique :

+ présence de nitrate en quantité importante pendant toute la période humide.

+ hautes températures du sol

+ périodes d'engorgement dues à de fortes pluies. On estime cependant que la dénitrification s'arrête lorqu'on est à moins de 60 % de la saturation du sol.

* Les facteurs qui seraient par contre défavorables sont :

+ pH acide : la réduction est inhibée en dessous de pH 7. Cependant on cite des exemples où elle a lieu dans des sols acides. (spécificité de la microflore).

+ texture des sols assez grossière et sols très poreux permettant une diffusion rapide et bonne de l'oxygène notamment dans les agrégats. Ainsi les pertes par dénitrification des nitrates entrainés par lixiviation en profondeur doivent être réduites.

+ perméabilité très importante des sols. Ce qui permet un ressuyage rapide. En quelques heures, l'excès d'eau est éliminé du profil, et la saturation du sol n'est que très passagère.

+ les pluies ont en général un caractère agressif : fortes précipitations en peu de temps. Les périodes d'engorgement et de saturation sont donc réduites dans ce type de sol très perméable. Les seules périodes d'engorgement marqué et prolongé du sol se situent en Septembre et aléatoirement en Juin en raison de la fréquence des pluies.

Résultats.

Nous ne disposons d'aucun résultat de mesure directe de la dénitrification biologique au champ.

Dans les essais où nous avons utilisé l'azote marqué, les défauts de bilan représentent la totalité des pertes dont la dénitrification ne représente qu'un aspect.

Seul un essai en vases permet d'apprécier ces pertes par l'examen du bilan de l'azote marqué.
Les conditions de réalisation permettent de penser que les pertes ont été dues essentiellement à la dénitrification biologique.

En effet, l'humidité du sol était maintenue à 20% pendant toute la culture du riz par un arrosage journalier qui provoquait un engorgement superficiel pendant plusieurs heures.

Dans cet essai, 400 ppm d'azote ont été apportés pendant la culture. En moyenne sur les différents traitements de l'essai, le défaut de bilan est de 50%, soit 200 ppm de l'azote apporté.
Les pertes sont donc très importantes dans ces conditions qui sont cependant très spéciales.

Conclusion.

Dans les conditions de culture pluviale, un certain nombre de facteurs sont favorables à la dénitrification biologique. Cependant les périodes qui réunissent les facteurs favorables sont de courte durée et de ce fait les pertes doivent porter sur des quantités d'azote peu importantes.

2) Pertes par volatilisation.

Ces pertes représentent la volatilisation de l'azote sous forme ammoniacale lorsque l'on apporte des engrais azotés à la surface du sol : l'ammonium formé à la surface du sol excède la capacité du sol de l'adsorber et de le retenir.

Le taux des pertes est influencé par les facteurs du milieu. Notamment les pertes sont importantes à des pH basiques ou en présence d'amendement calcaire. Le contact de fines particules de $CaCo_3$ induit la formation d'ammoniac à partir des ions ammonium.

Il est cependant difficile de mesurer ces pertes et surtout de les dissocier des phénomènes de dénitrification. Des petites expériences sommaires ont permis de montrer que pendant les quelques jours qui suivent l'épandage d'urée au champ, il y a une perte par volatilisation de l'azote engrais.

Une capsule d'acide sulfurique placée sous une cloche capte l'ammoniac dégagé du sol. L'acide est dosé et remplacé tous les deux jours pendant 15 jours.

L'urée apportée au sol était marquée par N-15. De ce fait une détermination isotopique de l'azote fixé dans l'acida permet de connaître avec certitude sa provenance.

Il apparaît que pendant 3 ou 4 jours après l'épandage on capte une certaine quantité d'ammoniac ayant le même enrichissement en N-15 que celui de l'engrais appliqué. On peut donc penser qu'il s'agit de pertes par volatilisation de l'engrais appliqué.

Il est difficile d'extrapoler les quantités analysées en unités par hectare. Celles-ci seraient de l'ordre de quelques unités pour un apport de 60 unités. On peut donc conclure que pour des apports d'engrais azotés de cet ordre, ces pertes peuvent être négligées dans ce type de sol.

3.5.2. Bilan de l'azote.

Il s'agit de dresser un inventaire et un bilan de l'azote dans le système sol-plante d'après les éléments que nous avons.

A - Azote dans le système sol-plante.

Nous étudierons chaque compartiment séparement puis le système sol-plante globalement.

a) Azote du sol.

Azote organique.

La majeure partie de l'azote du sol se trouve sous forme organique. Cette quantité dépend du type de sol et du milieu, et est variable dans le temps. On note en effet des variations interannuelles qui peuvent être importantes.

En général l'effet de la fumure azotée est faible même après plusieurs années de culture et on note une baisse sensible du stock.

Dans les sols considérés ce stock représente de 800 à 1400 ppm d'azote par rapport au sol sec, ce qui représente une quantité de l'ordre de 2400 à 5000 kg d'azote à l'hectare.

On peut considérer que les trois quarts de cet azote sont représentés par des formes minéralisables alors qu'un quart est inclus dans des produits stables et échappe ainsi au cycle de l'azote dans le système.

Azote minéral.

On admet que la minéralisation de l'azote organique suit une loi exponentielle $N = No \exp(-Kt)$.

On a mesuré la quantité d'azote libéré qui est de l'ordre de 0,8 ppm par jour à Bouaké et 0,5 ppm à Gagnoa ce qui correspond environ à $\frac{1}{3000}$ et $\frac{1}{10000}$ de la quantité d'azote organique. Les vitesses de minéralisation et de nitrification dépendent de plusieurs facteurs, dont le pH du sol, la nature de la matière organique du sol et la microflore présente dans le sol.

En présence de fumure azotée, on note dans le sol de Bouaké des pics de teneurs en azote minéral pouvant atteindre 100 ppm, ce qui représente une quantité de 300 unités. L'apport d'azote au sol stimule la minéralisation. Les teneurs en N-NH4 et N-NO3 dépendent de la fumure et de la culture en place.

Mais sur un sol non fertilisé les teneurs en azote minéral dépassent rarement 40 ppm, ce qui représente la minéralisation de 120 unités.

b) Azote dans la plante.

Les mobilisations potentielles maximales par le système aérien d'une culture de riz et d'une culture de maïs sont respectivement de l'ordre de 150 et 200 unités.

Nous ne parlons pas ici des mobilisations par le système racinaire qui sont comprises entre 10 et 25 unités car cet azote reste dans le sol est inclus après dégradation à celui du sol.

Il est rare que les conditions de culture permettent les rendements maxima et donc les mobilisations maxima. Prenons par exemple les mobilisations moyennes par traitement de la culture du riz (1973) et de celle de maïs (1974) de l'essai de Bouaké, nous avons les résultats suivants :

en unités	No	N1	N2
Riz	48	68	79
Maïs	66	127	136

Comme fourchette des variations des rendements et des teneurs, nous pouvons donner à titre indicatif pour ces cultures les chiffres trouvés sur ces essais et qui sont :

	M.S. paille t/ha	Teneur N% paille	Grain t/ha	Teneur N % grain
Riz pluvial	3 à 8	0,6 à 1,3	1 à 3	1,2 à 1,8
Maïs	4 à 9	0,4 à 0,9	3 à 8	1,2 à 1,9

Comme valeur moyenne, nous pouvons considérer les mobilisations par le riz à la récolte à 100 unités dont 45 u. par les grains, et à 130 unités pour le maïs dont 90 par les grains, sur des traitements fertilisés. Le sol non fertilisé ne permet pas de telles mobilisations.

B - Entrées dans le système sol-plante.

Les engrais.

Les apports se font généralement sous forme d'azote ammoniacal.

Les quantités apportées dans les essais sont en doses croissantes. On teste en particulier des fumures moyennes jugées optimum et des niveaux plus élevés pour atteindre le niveau de production maximum.

Cet azote-engrais est rapidement dilué dans le pool d'azote minéral du sol.

Fixation - la fixation biologique de l'azote atmosphérique semble dépendre d'un certain nombre de facteurs, en particulier de la culture et des variétés cultivées.

Cette fixation peut porter sur des quantités assez importantes d'azote, mais il est peu vraisemblable que dans nos essais cette quantité dépasse l'ordre de 30 unités, étant donné les mobilisations par les cultures en fonction des traitements.

Restitution.

Il est d'usage courant en Afrique d'enlever du champ ou de brûler les résidus de récolte. On a montré cependant tout l'intérêt de telles restitutions sur le maintien de la fertilité du sol. Nos essais prouvent que ces restitutions n'entrainent pas de blocage systématique de l'azote minéral du sol et qu'avec une fertilisation azotée, elles procurent souvent un surplus de rendement.

Les restitutions peuvent se faire simplement par enfouissement des pailles et les quantités d'azote fournies dépendent de la nature de la paille et des quantités.

Par exemple pour 1 tonne de paille apportée, nous avons couramment :

Kg	N	Carbone	C/N
Maïs	8	460	57
Riz	10	400	40

La restitution peut se faire également sous forme de paille préhumifiée, c'est-à-dire de compost ou de fumier.

La composition moyenne d'un compost de paille de maïs à Gagnoa est :

en kg/ tonne M.S.	N	Carbone	C/N
	18	300	16

Il y a lors de la préhumification des transformations en produits de la famille des acides humiques proches de ceux du sol avec des rapports C/N relativement bas. L'incubation de paille de riz pendant 60 jours donne les chiffres suivants :

Incubation	C/N	N total en % de M.S.
0 j.	41	1,0
30 j.	31	1,2
60 j.	25	1,5

Les formes d'azote dans ces matériaux ne sont pas les mêmes :

	NT	% de N total →			
	N total-%	N minéral	N hexoamine	N aminé	N non hydro.
Paille riz	1 %	0,01	0,10	0,65	0,23
Paille maïs	0,66 %	0,01	0,15	0,60	0,24
Compost maïs	1,65 %	0,01	0,17	0,67	0,15

Ces apports par les restitutions peuvent être donc connus avec une certaine précision, la qualité est cependant variable.

Pour une culture normale, les restitutions sont de l'ordre de 5 à 6 t. de matière sèche, ce qui représente 40 à 60 unités d'azote. Un apport de 40 t/ha de compost (humidité 75 %) représente lui une quantité d'azote de 180 unités.

Apports par les pluies.

L'ordre de grandeur est de 20 unités par hectare et par an. Cet azote est en partie sous forme organique.

C - Sorties du système sol-plante.

Lixiviation.

La lixiviation dépend du sol, de la topographie du climat et de la culture. Ces pertes sont donc très variables d'un endroit à un autre. Pour des cultures fertilisées, elles sont à Bouaké de l'ordre de 50 unités, tandis qu'à Gagnoa elles sont de l'ordre de 150 unités.

Dénitrification.

Dans les conditions du milieu, il est vraisemblable que les pertes par dénitrification chimiques sont plus importantes que celles par dénitrification biologique.

Ces pertes sont estimées dans des conditions normales de l'ordre de 50 u. dans un sol fertilisé, moyennement pourvu en azote minéral. Certains facteurs, notamment l'acidité du sol, sont favorables à des pertes (plus importantes dans des sols riches en azote minéral) qu'on peut estimer à une centaine d'unités.

Volatilisation.

Ces pertes peuvent être considérées comme négligeables.

Exportations.

Le niveau des exportations dépend du système de culture, c'est-à-dire de la restitution ou non des pailles. Nous avons vu que pour une culture moyenne de riz et de maïs hybride, il faut compter des exportations par les grains respectivement de 45 unités et 90 unités.

D - Réalisation d'un bilan moyen d'un système de sol cultivé.

- Données moyennes et variations pour des cultures autres que de légumineuses : cas d'une culture avec restitution de paille (50u. environ).

Entrées :	engrais	= 50 u.	100 u.
	fixation non symb.	= 30 u.	
	pluies	= 20 u.	
Sorties :	lixiviation	= 50 à 100u	125 à 290u.
	dénitrification	= 30 à 100u	
	exportation (grain uniquement)	= 45 à 90u	

On obtient un bilan qui varie de -25 unités dans les cas favorables à -190 unités dans les cas défavorables.

Ce déficit de bilan serait accru dans le cas de sol non fertilisé et de système de culture sans restitution organique.

- Interprétation :

Le bilan de l'azote dans les sols semble donc dans la majorité des cas déficitaire, ce qui explique les baisses si souvent observées du stock d'azote total du sol au cours des années de culture.

Après un certain temps de culture continue, il y a cependant un équilibre qui se réalise à un certain niveau, ce qui indique qu'on a atteint un système dans lequel le bilan peut être considéré comme nul - Il y a alors équilibre entre les sorties et entrées. Ce qui signifie qu'on a atteint un état d'équilibre dans lequel les besoins azotés de la culture sont limités par l'engrais et la minéralisation de l'azote organique en fonction du climat et de la plante. Ceci signifie également que les teneurs en azote minéral dans le sol sont suffisamment faibles pour limiter les pertes possibles par dénitrification et lixiviation - Les pertes sont alors légèrement plus faibles que celles données ci-dessous.

3.5.3. Bilan de l'azote-engrais.

On peut calculer avec une certaine précision les bilans d'azote -15 au champ.

Cette précision dépend essentiellement du taux d'enrichissement de l'engrais employé en azote marqué : plus l'enrichissement est élevé, plus la précision est grande et les risques d'erreur réduits.

Nous ferons le bilan de l'azote dans les cuves lysimétriques puis celui des essais au champ de Bouaké et de Gagnoa.

A. Cuves lysimétriques de Bouaké. (Tableau n° 21).

L'apport d'azote marqué a été réalisé en 1973 sur la culture de riz en deux fois : au semis et à la montaison.

+ Le pourcentage d'azote 15 retrouvé pour la dose N1 (60u.) se décompose ainsi :

Apport	Utilisation par la plante	Immobilisation 0-25cm	Pertes lixivi.	Total
60 u.	16 u.	42 u.	1 u.	59 u.
%	26 %	70 %	1,6 %	97,6 %

- Le déficit de bilan est donc très faible.

+ Pour la dose N2, le pourcentage d'azote retrouvé est :

Apport	Utilisation par la plante	Immobilisation	Pertes	Total
120 u.	28 u.	66 u.	6 u.	100 u.
%	23 %	55 %	5 %	83 %

Il apparaît un déficit de bilan de 17 %. Les 20 unités manquantes peuvent être en partie immobilisées dans la tranche de sol inférieure et en partie perdues par dénitrification.

Le coefficient d'utilisation résiduel de l'engrais sur la culture de maïs 1974 est de 6 %, soit des quantités absorbées de 3,6 unités pour N1 et 7.2 u. pour N2.

On retrouve des résultats proches de ceux que l'on obtient en plein champ.

Le bilan, à la fin 1974 est donc le suivant :

Bilan 74 en unités	N1	N2
utilisé par le riz 73	16	28
utilisé par le maïs 74	3.6	7.2
utilisé par le coton 74	0.5	0.7
pertes par lixiv. 73-74	2.8	9.6
immobilisé dans le sol fin 74	24.5	38.4
Total retrouvé	47.4 u.	83
recouvrement %	79	70 %

Au cours de ce second cycle cultural on a donc perdu environ 18 u. sur N1 et 13 u. sur N2 dans l'horizon supérieur.

Il reste encore après la deuxième année de culture dans le sol 41 % de l'engrais N1 et 32 % de l'engrais N2 soit 24,5 et 38,4 unités d'azote engrais.

Un calcul rapide permet de constater que cet azote résiduel est plus disponible que l'azote du sol après la culture 1973. Si on considère que la minéralisation annuelle est de l'ordre de 6% de la quantité globale, on aurait pour 42 u., une minéralisation de 2,5 unités. Or on constate une mobilisation en arrière-action par le maïs de N1 de 3,6 unités avec des pertes par lixiviation en plus.

Ce qui nécessite une minéralisation préférentielle de l'azote engrais résiduel apporté l'année précédente.

Par contre après le maïs, on devrait avoir une minéralisation de l'ordre de 1,5 unités, or on constate une absorption de 0,5 unité par le coton. On peut donc penser que l'azote qui reste à ce moment est plus stable et plus difficilement minéralisable.

Il y aurait donc une réorganisation à long terme de l'azote résiduel d'une fumure azotée vers des formes stables de l'azote dans des complexes difficilement minéralisables.

En conclusion, le bilan de l'azote engrais après la première culture prouve qu'il y a peu de pertes par lixiviation de cet azote, peu de pertes par dénitrification pour des apports faibles mais des pertes substantielles pour des apports importants. Les pertes, essentiellement par dénitrification, ont lieu au fur et à mesure des cycles de minéralisation de l'azote et deviennent au bout d'un certain temps indépendantes des quantités initiales ajoutées.

2 -. Cuves lysimétriques de Gagnoa. (Tableau n° 22).

L'apport d'azote marqué a été fait sur la culture de maïs 1er cycle en 1973 en deux fois : une moitié au semis, une moitié à la floraison.

La quantité d'azote retrouvée après culture 73 est la suivante :

	Unités	% apport
Apport	100	100
utilisation par le maïs 1er cycle	35	35
immobilisation dans le sol 0-30 cm après culture.	35	35
pertes par lixiviation	4	4
Total - recouvrement %	74 %	74 %
Pertes estimées	26 %	26 %

L'utilisation par le maïs 2ème cycle n'a pas été nulle mais aucune récolte n'a été faite, les pieds de maïs ayant été attaqués par les borers, ils ont versé prématurement et ont pourri sur place. Seul sur une cuve, 1 pied malingre est parvenu jusqu'à maturation.

On note des pertes de 26 %. L'explication de ces pertes peut être recherchée d'une part par une réorganisation faible dans la tranche de sol inférieure, d'autre part par des pertes par dénitrification assez importantes.

Le coefficient d'utilisation de cet engrais résiduel par la culture de maïs 1974 en premier cycle est de 1% pour une quantité d'azote résiduel de l'engrais de 35 unités. Soit encore 3 % environ de l'utilisation de l'engrais résiduel.

Les pertes en 1 an après deux cycles culturaux à partir d'un apport de 100 unités réalisé en deux fois sur le premier cycle sont estimées à 30% dont 4% par lixiviation. Le reste peut être imputé à des pertes par dénitrification. L'utilisation par la culture reste faible malgré l'apport réalisé en deux fois. La mauvaise utilisation de cet azote est explicable par le turn-over de l'azote engrais avec l'azote organique du sol, car la réorganisation est importante.

C. - Bilan Bouaké 1973 : Essai "Azote-paille".

Nous pouvons calculer le bilan de l'azote-engrais de l'horizon 0-25 cm pour 1973 sur les sous-parcelles ayant reçu l'azote marqué du bloc 5 (engrais fortement enrichi à 10 %).

	N apporté			
	30 + 30		60 + 60	
	1er ap.	2ème ap.	1er ap.	2ème ap.
absorbé par la plante	7	13	11	21
immobilisé dans le sol	19	15	18	20
sous-forme minérale	1	1	2	1
déficit de bilan	- 3	- 1	-29	-18

Nous savons par l'étude lysimétrique que les pertes par lixiviation sont faibles.

Ces résultats montrent que :

- pour l'apport de 60 u. les pertes sont très faibles (lixiviation essentiellement).
- pour l'apport de 120 u. les pertes sont importantes, elles le sont d'avantage pour le premier apport (50%) que pour le second (30%).
- ceci montre que la dose N1 est bien utilisée par le système plante sol, alors que la dose N2 est trop importante.

D. - Bilan Bouaké 1974.

Le bilan a été fait après les deux cultures de l'année 74 sur les sous-parcelles recevant l'azote marqué du bloc 5 (enrichissement de l'engrais 5%).

	N1		N2	
	50 + 50		100 +100	
	1er ap.	2ème ap.	1er ap.	2ème ap.
absorbé par le maïs	22	22	38	20
absorbé par le coton en arrière-action.	0.5	2	2	4
dans le sol après culture 0-25 cm.	8	10	12	15
déficit en unité	19	16	48	61
pertes en % en 1 an	39	32	48	61

Le déficit de bilan de l'azote est assez important après deux cycles culturaux.

La moitié de l'azote engrais a disparu sur N2. Les pertes sont plus élevées pour les apports importants que pour des apports moyens.

Comme on sait que les pertes par lixiviation sont peu élevées, on peut imputer la plupart de ces pertes à la dénitrification. Ces pertes sont plus importantes pour les apports élevés, d'une part en raison des teneurs plus élevées en azote minéral dans le sol, d'autre part en raison du pH du sol plus acide sur ces traitements.

E - Bilan des essais de Gagnoa.

Sur les sous-parcelles dans lesquelles l'azote marqué avait été apporté, des prélèvements systématiques de sol ont été faits jusqu'à 1 mètre de profondeur, juste après la récolte du 1er cycle de maïs.

Seul l'horizon supérieur contenait une quantité suffisante de N-15 pour que l'analyse soit possible.

* Essai "Paille-compost".

L'azote est apporté à 25 jours après semis. Le bilan calculé sur la moyenne des traitements N1 est :

	N apporté 100 u.	
utilisé par le maïs	35 u.	
immobilisé dans le sol	50 u.	
Total pertes	15 u.	soit 15 %

* Essai "Azote-paille".

L'azote est apporté en deux fois (moyenne des traitements N1 et N2)

	N apporté			
	50 u.		100 u.	
	25-1e ap.	25-2è ap.	50-1e ap.	50-2è ap.
utilisé par le maïs	7.5	12.6	12.5	21.5
immobilisé dans le sol	9	12	18	21
Total pertes	8.5	0.5	19.5	7.5
pertes %	34	2	39	15

* Essai "Azote-compost".

L'azote est apporté en deux fois (moyenne des traitements) (MoN2 et M1N2)

	N apporté	
	80 u.	
	1er ap. 40 u.	2è ap. 40 u.
utilisé par le maïs	12,8	16,8
immobilisé dans le sol	18	24
Total pertes	9,2	0
Pertes %	23	0

+ L'effet des enfouissements de matière organique dans le sol ne donne pas de résultats significativement différents, aussi a-t-on présenté la moyenne par traitement de ces essais.

+ Si l'on prend ces chiffres, on s'aperçoit que les pertes pour les apports d'azote réalisés en début de culture sont assez importantes : 15 à 40 %. Par contre les pertes pour les apports réalisés à la floraison sont faibles 0 à 15 %. Dans ce cas l'immbbilisation dans le sol et l'utilisation par la plante sont de même ordre de grandeur.

Nous savons par ailleurs que les pertes par lixiviation sont très faibles. La plus grande partie de ces pertes est donc due à des phénomènes de dénitrification.

F - Conclusions sur le bilan de l'Azote-engrais.

Le calcul du bilan, grâce à l'utilisation de l'azote 15, permet l'appréciation des pertes. Les pertes par lixiviation étant faibles, la plus grande partie des pertes sont imputables à la dénitrification.

De ce fait, les pertes dépendent des doses d'engrais ajoutées et du pH du sol, ces deux facteurs étant liés dans les essais pluriannuels. Plus les apports sont importants, plus les pertes sont élevées.

Les pertes dépendent également de la culture. Il semble que les pertes sous culture de riz sont beaucoup plus faibles que sous maïs. Ceci peut être dû à l'absorption préférentielle de la forme ammoniacale par le riz, ce qui limite les pertes de l'engrais.

L'engrais apporté en début de culture subit beaucoup plus de pertes que l'engrais apporté en couverture, au moment de la demande instantanée maximum de la culture.

De façon générale, l'apport de couverture, est utilisé par la culture (50 % au maximum) et réorganisé au sein de la matière organique dans la même proportion et subit peu des pertes par lixiviation et dénitrification. L'engrais résiduel qui reste dans le sol après la culture est utilisable en partie par minéralisation par les cultures postérieures. Cet azote semble plus facilement mobilisable que celui du sol pour la culture suivante.

CONCLUSION GENERALE

Un nombre assez important de résultats a été obtenu dans le cadre de cette étude portant sur le devenir de l'azote dans un système sol-plante.

Avant de les commenter, il convient d'expliciter le contexte général de la fumure azotée, afin de savoir quels éclaircissements les résultats obtenus peuvent apporter aux problèmes que pose cette fumure en milieu tropical.

La nutrition minérale de la plante est assurée grâce à l'aptitude du sol à mettre à la disposition de celle-ci une partie de ses réserves sous une forme assimilable.

Lorsque la fertilité du sol n'est pas suffisante, c'est-à-dire lorsque la mise à la disposition des éléments ne peut couvrir les besoins d'une culture, il faut recourir à la fertilisation.

Dans le cas de l'azote la réserve est entièrement liée à la matière organique du sol. En milieu tropical, les mises en culture se font généralement sur des sols récemment déforestés. Le taux de matière organique sous forêt a un niveau d'équilibre assez élevé, mais on constate presque toujours une chute rapide de celui-ci après mise en culture.

En quelques années le taux de matière organique tend alors asymptotiquement vers une valeur faible en équilibre avec le milieu artificiel. Le rapport C/N est relativement constant pour un milieu défini.

Pendant cette phase de minéralisation rapide des réserves, les quantités d'azote minéral libérées sont considérables et il est difficile de freiner ces phénomènes consécutifs au défrichement. Une grande partie de cet azote est en conséquence perdue.

Pour l'agronome, il s'agit essentiellement de stabiliser le niveau d'équilibre des réserves azotées à un seuil convenable pour les cultures et d'entretenir ces réserves pour permettre une culture continue.

Pour cela on définit une fumure d'entretien qui permet au sol de maintenir un niveau de fertilité convenable et qui assure à la plante une nutrition conduisant à un rendement économique optimum. Ce dernier ne correspond généralement pas au rendement maximum.

Les efforts de la recherche doivent porter sur deux points essentiels : augmentation de l'utilisation de l'azote-engrais par la plante est limitation des pertes de l'azote-engrais et de l'azote du sol.

La recherche de l'optimum de la fumure azotée est extrêmement complexe car on doit tenir compte du bilan dans le sol, qui doit ^être positif, (apports supérieurs aux pertes), et de la rentabilité économique de l'apport. L'azote est un engrais très cher dont le prix ne cesse d'augmenter.

Les courbes de réponse à l'azote des cultures en conditions naturelles permettent de situer le niveau économique optimum en tenant compte de deux aspects : rentabilité à court terme et rentabilité à moyen et long terme, c'est-à-dire maintien de potentiel de production du sol.

On comprend donc que pour définir cette fertilisation azotée dans une rotation de cultures assolées, on ait besoin de connaître le cycle de l'azote dans le système sol-plante.

Les méthodes employées dans cette étude, basées sur l'utilisation de marqueur isotopique, permettent d'obtenir des résultats précis et de les interpréter en vue de répondre aux problèmes tels qu'ils se présentent dans le contexte général.

A - Les résultats obtenus peuvent se résumer ainsi :

I - Dans le sol

Les deux sols étudiés ont évolué, sur un matériau de même nature mais dans des conditions différentes de milieu. Ceci se traduit par des variations dans la composition de la matière organique et du cycle de l'azote.

. Minéralisation et Réorganisation

- La minéralisation qui est la production d'azote minéral à partir de l'azote organique constitue la principale source d'alimentation azotée des cultures.

  On constate que les vitesses de minéralisation sont variables d'un sol à un autre et dépendent d'un certain nombre de facteurs. Lorsque les sols s'acidifient la minéralisation est moins intense et l'azote est soumis à des pertes gazeuses plus importantes par dénitrification. On peut influencer la minéralisation par des traitements au champ : les apports de compost et d'engrais azoté la favorisent, l'élévation du pH du sol augmente son intensité en améliorant particulièrement la nitrification, c'est-à-dire le passage de la forme ammoniacale à la forme nitrique.

  L'étude des conditions naturelles de la dynamique de l'azote dans le sol de Bouaké montre que la minéralisation cesse en saison sêche par un effet de stérélisation partielle de la microflore, mais qu'elle reprend avec les premières pluies avec une grande intensité.

Il se produit alors des fluctuations importantes des teneurs en azote minéral dans le sol. L'azote est en effet minéralisé lorsque les conditions sont favorables et il est ensuite utilisé par la plante ou perdu par lixiviation, suivant les conditions du milieu. Les apports d'engrais ont une action sur les teneurs, plus ou moins fugace selon les quantités introduites et l'époque d'apport sur la culture. Si la plante n'a pas de gros besoins, l'engrais reste disponible en partie sous la forme minérale. Si la demande est élevée, les teneurs en azote minéral du sol diminuent très fortement. Cette diminution est plus forte pour l'une ou l'autre forme minérale selon la culture. C'est ainsi que le riz utilisera principalement la forme ammoniacale et le maïs la forme nitrique.

Contrairement à ce que l'on constate généralement, la présence de paille enfouie n'a pas d'effet d'immobilisation rapide et importante sur l'azote minéral présent dans l'horizon cultural. Cet enfouissement améliore légèrement la nitrification.

- La réorganisation qui correspond au passage de la forme minérale de l'azote au stock organique du sol est intense dans les sols étudiés. Les vitesses de renouvellement sont élevées. C'est-à-dire qu'une partie de l'azote-engrais apporté se réorganise rapidement pendant qu'une partie au moins égale d'azote est minéralisée à partir de stock organique. On note un effet de stimulation de l'apport sur cette minéralisation, d'autant plus intense que le sol est acidifié. Il y a donc plus d'azote minéralisé que d'azote-engrais réorganisé pendant le même temps.
  Le sol est capable de réorganiser plus d'azote que la plante ne peut en mobiliser. L'incorporation de l'azote-engrais se fait préférentiellement dans la fraction azote-aminé qui représente la plus grande part de l'azote mobile du sol.
  Cet azote stocké est réutilisable par les cultures suivantes, mais il est soumis alors au cycle de l'azote du sol et donc à des pertes possibles.
  La capacité d'un sol à fournir de l'azote à une culture peut être appréciée par une analyse chimique quantifiant le stock aminé par rapport aux autres formes d'azote organique.

. Dénitrification chimique

Lors de la nitrification, les pertes gazeuses à partir des nitrites peuvent être élevées. Une estimation basée sur l'utilisation d'un modèle mathématique montre qu'elles peuvent atteindre de 20 à 40% de l'azote minéral présent. Ces pertes sont favorisées : par l'acidité du sol, par des périodes de dessiccation et par des températures élevées. Ces conditions se rencontrent dans les sols étudiés.

L'étude du bilan de l'azote-engrais montre que les pertes dépendent de la culture, des quantités d'engrais apportées et de la date d'apport.

On peut en conséquence les diminuer partiellement par des techniques appropriées de fertilisation (Inhibition de la minéralisation et de la nitrification de l'azote-engrais - Apport d'engrais aux périodes de demande maximale de la culture - Fractionnement des doses au cours du cycle sil les apports sont importants).

. Lixiviation

L'intensité de la lixiviation dépend principalement du type de sol et de la pluviométrie.
Elles sont importantes à Gagnoa (140 unités) et moins fortes à Bouaké (50 unités) dans les conditions de culture intensive.
La vitesse de lixiviation à travers le profil cultural est supérieure dans le sol de Gagnoa, celui-ci étant plus perméable que celui de Bouaké. La matière organique étant moins polymérisée et les quantités d'eau percolante étant supérieures, on s'explique l'importance de la lixiviation en zone forestière.
Dans les deux cas une grande partie de l'azote minéralisé en début de culture est perdue par lixiviation en période de pluie.
Le système racinaire, même si la culture est mise en place très tôt, n'a pas une croissance suffisament rapide pour permettre l'utilisation de tout cet azote qui migre rapidement à travers l'horizon cultural. Pendant le cycle cultural plusieurs periodes de lixiviation intense sont observées en relation avec l'importance des pluies.
Les pertes proviennent principalement de l'azote minéralisé par le stock organique et peu de celui de l'engrais apporté. Ceci s'explique par la rapidité de la réorganisation de l'azote-engrais et par sa mobilisation par la culture. L'azote apporté disparaît suffisament vite du pool minéral pour échapper à ces pertes, mais il est remplacé progressivement par de l'azote minéral du sol qui lui est plus longtemps soumis à la lixiviation.
L'influence des quantités d'azote apporté sur les pertes n'est donc pas proportionnelle à l'apport. Cet effet reste quand même positif et s'explique par la stimulation de l'engrais sur la minéralisation.
Pour réduire ces pertes, il convient de diminuer d'une part le drainage et d'autre part de limiter l'apparition des nitrates dans l'horizon cultural.

II - Dans la plante

En conditions d'équilibre humique, les sols cultivés non fertilisés semblent pouvoir fournir régulièrement au moins 60 unités d'azote à la culture. Ceci correspond à une vitesse de transfert de l'ordre de 1 kg de N/ha/jour. Cette capacité peut servir de base au calcul de la fumure d'entretien.

Les quantités à apporter dépendent des rendements escomptés et l'apport économique se situe entre 50 et 100 unités selon le type de culture. Si les autres facteurs sont favorables, ceci se traduit par une amélioration du rendement et de la qualité des récoltes. Pour atteindre le rendement maximum d'une culture de maïs à haut potentiel qui est très exigente en azote, il faudrait une fertilisation de 200 unités sur un sol cultivé de façon continue, tous les autres facteurs étant favorables. L'augmentation de la teneur des grains en protéïnes est de 50% avec une forte fertilisation et l'augmentation de la quantité de protéïnes produite à l'hectare peut être de 200%.
L'utilisation directe ou réelle de l'engrais par la plante reste faible comparativement à ce qu'on connait en pays tempéré.
L'utilisation réelle d'un apport en couverture est généralement meilleure que celle d'un apport réalisé en début de cycle.
L'absorption sert surtout pour la formation des grains. Pour que l'utilisation directe soit meilleure, il convient d'apporter l'engrais à une période de très forte demande de la plante afin que celle-ci soit compétitive par rapport aux microorganismes du sol.
Cette période correspond pour le riz à la montaison et pour le maïs au stade de la floraison.

III - Transfert dans le système sol-plante

Le riz utilise préférentiellement l'azote ammoniacal et le maïs l'azote nitrique. Les pertes sont donc moins importantes sous la culture de riz.
L'absorption est discontinue au cours du cycle et dépend notament de l'alimentation hydrique de la plante et de son stade physiologique.
On doit rechercher avec lapport d'engrais un équilibre entre l'offre et la demande pour une bonne efficacité de l'engrais. La vitesse de transfert peut passer de 1 kg/ha/jour à 2 ou 3 kg/ha/jour selon la quantité apportée et la demande de la plante.

IV - Bilan de l'azote dans le système sol-plante

a) Bilan de l'azote en général dans l'ensemble du système:

Si l'on calcule un bilan théorique moyen en estimant les données manquantes on comptabilise environ 150 unités pour les entrées (engrais, restitution, fixation) et de 145 à 340 unités pour pour les sorties (exportations et pertes).
Le bilan est donc généralement déficitaire et on épuise au fur et à mesure le stock d'azote du sol jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse pour des entrées et des sorties de l'ordre de 150 unités.

b) Bilan de N-engrais dans le système :

Le bilan est rendu possible grâce à l'utilisation de l'azote marqué.
L'engrais est peu utilisé par la plante (50% au maximum) et est fortement réorganisé sous forme d'azote aminé essentiellement.
Les pertes directes par lixiviation sont faibles, mais les pertes par dénitrification peuvent être élevées. Elles dépendent de plusieurs facteurs, dont les principaux sont : le type de culture, les conditions culturales, les quantités d'engrais et la date d'apport.
Avec la culture de riz les pertes sont moins importantes qu' avec le maïs. Ceci est à relier à l'absorption préférentielle de l'azote ammoniacal par le riz, ce qui limite les pertes possibles par dénitrification et lixiviation.

B - Les principales techniques susceptibles d'améliorer le bilan, d'optimiser la fumure et d'augmenter les rendements, sont les suivantes :

- Mettre en place une culture dès les premières pluies pour utiliser au maximum l'azote minéralisé par le sol.
l'apport d'engrais à ce stade n'est souvent pas indispensable dans le cas de sols non épuisés.
Si l'on veut réaliser un cycle cultural unique avec une mise en place tardive, il faut alors laisser le sol enherbé, car la végétation naturelle est capable d'utiliser l'azote minéralisé par le sol.
L'enfouissement de cette végétation comme engrais vert avant culture permet la restitution de cet azote au sol et à la culture suivante.

- Ne pas apporter l'engrais à une culture si ce n'est pas indispensable, par exemple après un défrichement. La période d'abondance en azote qui suit un défrichement est plus ou moins longue, suivant le contexte et peut durer plusieurs années.

- Eviter d'employer des taux excessifs d'engrais. Il s'avère que les doses économiques vulgarisables sont en général de l'ordre d'une cinquantaine d'unités et pour un maïs hybride à haut potentiel de 80 à 100 unités. Economiquement la rentabilisation de l'engrais n'est pas toujours assurée étant donné l'irrégularité des pluies qui caractérise ces zones de production.
Les conditions pluviométriques permettent rarement d'atteindre le maximum de rendement et d'autre part une culture fortement développée, riche en azote supporte beaucoup moins bien des périodes sèches qu'une culture moins fertilisée et moins développée.
Il est fréquent que de fortes doses d'azote donnent des rendements inférieurs à ceux obtenus pour des doses plus faibles, lorsqu'il y a des périodes sèches pendant le cycle.
Il convient d'apporter l'engrais en périodes de demande maximale de la culture.

- Inhiber la nitrification de l'azote-engrais pour diminuer les pertes et augmenter l'efficacité.
  Par exemple, de fortes teneurs en N-NH4 peuvent inhiber localement la nitrification. On conseillera l'emploi de NH4OH sous forme liquide en placement localisé. Il existe également de nouveaux engrais avec inhibiteur de minéralisation et d'autres à libération lente qui sont plus ou moins efficaces dans ce type de sol.

- Utiliser une fumure organique.
  Il apparait qu'elle est efficace pour relever le niveau d'équilibre de l'ensemble des réserves organiques du sol. Le phénomène est très marqué dans le cas du compost et beaucoup moins dans celui de la paille. On a montré que ces enfouissements maintenaient le pH et augmentaient le stock d'éléments nutritifs.
  Le cas du compost est très net. Il stabilise le niveau d'équilibre humique à une valeur supérieure à ce qu'elle est sans apport. Ceci se traduit par un surplus de rendement de l'ordre de 20% qui est expliqué par l'amélioration de la nutrition azotée, mais également par celle de la nutrition en phosphore. Dans ce cas, la qualité des éléments mis à la disposition de la plante joue certainement un rôle important en plus de la simple augmentation des stocks. Comme par exemple la présence de certains molécules organiques directement assimilables par la plante. Le cas de la paille est moins net et il faut plusieurs années consécutives d'apport pour voir apparaître les effets bénéfiques sur le bilan azoté et humique.

- Les restitutions n'ont d'autre part pas d'effets défavorables immédiats sur la nutrition azotée de la culture. Il y a donc lieu de vulgariser les techniques des restitutions de résidus végétaux, sous forme de compost quand c'est réalisable pour maintenir et améliorer la fertilité du sol.

- Ces techniques sont cependant difficilement utilisables actuellement en milieu paysan et il convient d'expérimenter celles qui sont les plus simples. Le mulch de paille ou paillis semble a priori intéressant dans certains cas. De nouvelles expérimentations sont à faire, en liaison avec les techniques de restitution des résidus, pour améliorer l'efficacité des engrais azotés.

Pour conclure il importe de signaler l'intérêt que présenteraient des recherches sur des techniques de fixation naturelle de l'azote par voie associative avec les céréales, ou par voie symbiotique avec les légumineuses. Ces techniques de fertilisation gratuite pourraient être promises à un grand avenir, sans toutefois se substituer entièrement à la fertilisation azotée. Elles devraient permettre des économies substantielles au niveau des agrosystèmes. La lourde charge imposée aux économies nationales par l'emploi d'engrais azotés chimiques pour le développement de l'agriculture, pourra être réduite simultanément par la mise au point des techniques d'optimisation de la fumure azotée et de fixation naturelle de l'azote.

B I B L I O G R A P H I E.

ADJANOHOUN (E) - GUILLAUMET (JL) 1967 : Carte de la végétation de la Côte d'Ivoire - ORSTOM.

AIEA - 1970 : Rice fertilisation - n° 108 - VIENNE

AIEA - 1970 : Fertilizer Management Practics for maïze Results of experiments with isotops P 35 - VIENNE

AIEA - 1971 : Nitrogen 15 in Soil-plant - Studies n° 15 - VIENNE

AIEA - 1974 : Isotope studies on wheat fertilisation n° 157 - VIENNE

AIEA - : Effect of Agricultural production on nitrates in food and water with particular reference to isotope studies - VIENNE 1974.

AL ZAHAWE - 1976 : Evolution de la fertilité d'un sol ferrallitique de Côte d'Ivoire en condition de culture intensive. Thèse - Univ. Sciences et techn. du Languedoc. Montpellier 102 p.

AL ZAHAWE - J. PICHOT - P.F CHABALIER 1976 : Etude de l'évolution d'un sol ferrallitique de Côte d'Ivoire après la mise en culture. Communication au Colloque inter. sur les études de la M.O. du sol. Brunswick 6-10 Sept. 76.

ALLISON (P.E) 1955 : Losses as nitrite oxide by chemical Reaction - Adv. in Agron. 7 - pp. 215 - 250.

ALLISON (PE) 1963 : Losses of gazeous N from soils by chemical mechanisms involving HNO2 and NO2-N Soil Sci. 96 - 404 - 409.

AUBERT (G) SEGALEN (P) : Projet de classification des sols ferrallitiques - Cah. ORSTOM - Ser. Pédol. IV 4 - 97-112.

ASECNA - 1971 : Tableaux climatologiques de la Côte d'Ivoire (1961-1970) ABIDJAN

ATANASIU (N) - 1968 : Exploitation de l'azote du sol par les plantes. (Résultats d'essais réalisés avec du 15 N) STIKSTOF (the Hague) n° 12 - pp. 17-21.

BARTHOLOME W.V. - CLARK F.E - 1965 : Soil Nitrogen Am. Soc. of Agro. N° 10 615p.

BREMNER (JM) 1965 : Organic forms of Nitrogen in methods of Soil analysis. LA Black ed. Agro. vol 9-2 p.1238-1255.

BERLIER (Y) - GUIRAUD (G) 1966 : Absorption et utilisation par des graminées de l'azote nitrique et ammoniacal marqué à N-15. Isotopes in plant nutrition and physiologie - Proceedings of a symposium - VIENNE - pp.145-157.

BURRIS (GH) 1959 : Nitrogen nutrition - An. Re. Plant - Physiol. 10 - 301-328.

BARBIER (G) - CHABANNES (J) 1963 : Stockage d'azote dans le sol sous forme minéralisable par application d'azote minéral.
Comp. and. Acad. Agric. 7 - 550-555.

BAYENS (J) - 1967 : Nutrition des plantes de culture. Université de Louvain, Institut de pédologie.

CHABALIER (PF) - GUIRAUD (G) - PICHOT (J) REMY (JC) - Sept. 75 : Evolution de l'azote des engrais dans les sols cultivés.
Compte rendu de fin d'étude DGRST.

CHAMINADE (R) 1958 : Influence de la matière organique humifiée sur l'efficacité de l'azote. Am. Agron. 2, 167-192.

CHAMINADE (R) 1963 : Influence de la paille à différents états de fermentation sur la fertilité d'un sol. Am. Agron. 14 - 1-5-12.

CHAMINADE (R) 1965a : Recherches sur la fertilité et la fertilisation des sols tropicaux. Principes de bases et techniques.
Agron. Trop. N° 20 - pp.1014-1017.

CHAMINADE (R) 1971 : Aspects agronomiques de la rentabilité de la fertilisation.
Agron. Trop. 26, pp.265-269.

CHABANNES (J) - BARBIER (G) - DRIARD (G) 1964 : Nouvelles observations sur la minéralisation de l'azote dans le sol au printemps.
Compte-rendu Acad. Agric. - 10, 874-881.

CHABANNES (J) - BARBIER (G) 1967 : Stimulation de la minéralisation printanière de l'azote du sol par l'apport d'azote minéral.
Compt. rend. Acad. Agric. N° 1 - 96-101.

COLLIER (MD) 1966 : Complexité de l'évolution de l'azote dans le sol et son incidence sur l'estimation de la fumure azotée. N° 17 - 1305-1313.

COLLIER (MD) 1966 : Essais de détermination du bilan humique du sol à partir de la balance des importations et exportation de l'azote.
Comp. Rend. Acad. Agric. 15 - 1094-1102.

DECAU (J) 1968-1969 : Contribution à l'étude de l'influence des conditions du milieu sur la répartition de l'azote du sol. - Am. Agron.
I Principales formes d'azote obtenues par hydrol. 19 -6 -653-683
II Acides aminés extraits par hydrolyse - 20 - 1 - 35-59
III Acides aminés et conditions d'aération - 20-3 - 277-303

DELAS (J) - JUSTE (C) et al 1967 : Evolution de l'azote minéral, du carbone de l'aluminium et du pH dans un sol de Toruyos cultivé recemment défriché-
CR Acad. Sci. 1130 - 1138.

DOMMERGUES (Y) 1962 : Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche. Thèse faculté des sciences Paris.

BREMNER (JM) - EDWARDS (AP) 1965 : Determination and isotope ratio analysis of different forms of nitrogen in soils.
Soil Sci. sc. AMER-proc. 29- 504-507.

BURDIN (S) - EGOUMENIDES (C) 1973 : Détermination de l'azote ammoniacal et nitrique dans les sols et les eaux - Dosage automatique.
Agron. Tropic. Vol 28-22 - 1193-1199.

BARTHOLOMEW (WV) CLARK (FE) 1965 : Soil Nitrogen - Am. Soc. of Agro. n° 10 - USA.

BALAN DREAU (J) - VILLEMIN (G) 1973 : Fixation biologique de l'azote moléculaire en savane de Lamto (Côte d'Ivoire) Rev. Ecol. Biol. Sol.

BREMNER (JM) - NELSON (DW) 1968 : Chemical decomposition of NO2 in soils
Trans. 9 th. Int. Cong. Soil Sci. II.

BLONDEL (D) 1971 : Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol sableux au Sénégal - Agron. Trop. XXVI - 12 - 1303-1333.

BLONDEL (D) 1971 : Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote en sol ferrugineux tropical à SEFA (Sénégal) Agron. Trop. XXVI - 12 -1334-1353.

BLONDEL (D) 1971 : Contribution à la connaissance de la dynamique de l'azote minéral en sol ferrugineux tropical à Nioro du Rip. Agron. Trop. XXVI 12-1354-1361

BLONDEL (D) 1971 : Rôle de la plante dans l'orientation de la dynamique de l'azote en sol sableux. Agron. Trop. XXVI 12 - 1362-1371.

BLONDEL (D) 1971 : Rôle de la matière organique libre dans la minéralisation en sol sableux, relation avec l'alimentation azotée du mil. Agron. Trop. XXVI - 12 - 1372-1377.

BLONDEL (D) 1971 : Recherche des acides aminés libres dans deux sols sableux. Evolution de la teneur en acides aminés et en azote minéral au cours d'épreuves d'incubation - Agron. Trop. XXVI - 12 - 1278-1388.

BOISCHOT (P) - SYLVESTRE (G) 1951 : Fixation de l'azote nitrique par les micro-organismes décomposant les pailles de céréales dans le sol.
CRAc. Sci Sc. 232 - p.2253-2255.

BRAUD (M) 1972 : Le contrôle de la nutrition minérale du cotonnier par analyses foliaires. Doc. Reneo IRCT 30p.

BOISCHOT (P) 1960 : Le rôle des micro-organismes dans la fixation de l'azote du sol - Bull. AFES - 10 p.492-496.

BONNEAU - 1967 : Minéralisation de l'azote de deux sols des hautes. Vosages : allures du phénomène et tentatives d'amélioration
Sci. du sol - 1 - p.19-48.

DOMMERGUES (Y) MANGENOT (F) 1970 : Ecologie microbienne du sol - Masson 786p.

DOMMERGUES (Y) - BALANDREAU (J) - RINAUDO (P) 1973 : Non symbiotic nitrogen fixation in the rhizosphère of rice - maïze - and different tropical grasses - Soil Biol. Biochem. 5 - 83-89.

DROUINEAU (G) 1965 - Métabolisme de l'azote dans les sols - Aspect agronomique et chimique - An. Inst. Pasteur - N° 109 - Sept. 1965 pp.7-17.

DROUINEAU (G) 1963 : Fumures minérales et fumures organiques - Bull. AFES -2- 85-108.

DU CHAUFFOUR (PH) 1953 : Humus actif et humus inerte - Recherches expérimentales sur la minéralisation de l'humus forestier. Am. Ecol. eaux Forêts - NANCY - XIII - 2 - 402-453.

DULAC (J) 1955 : Diagnostic foliaire des céréales ... III. Application de la relation azote-rendement au maïs. IV. Relations entre la "teneur en azote" de la feuille de l'épi, le "rendement hectare", le "rendement par pied" et la "densité" chez le maïs. Compte-rendu. Ac. Agric. FRANCE - Séance du 12 Janvier 1955 pp.500-507.

ELDOR (AP) 1970 : Plant components and soil organic matter - Recent advancs in phytochemistry. 3 - 59-104.

FLAIG (W) 1959 : Uber dic biochemische Bildung von Humusstoffen ans lignin - 4 th. Cong. Inter. Bioch. Pergamon Ress. - NEW-YORK.

FLAIG (W) 1955 : Zur bildungs möglichkeit von Humin Suren ans lignin - Holz foresching - 9 - 1-4.

FARES HAMAD (I) 1973 : Optimilisation de l'activité nitrogenasique et de sa mesure dans le rhizosphère du Riz. Thèse Doctorat spec. Univ. - NANCY.

FLAIG (W) 1971 : Organic compoumds in soil - Soil Sci. 111 - 1 - 19-33.

GUIRAUD (G) - PACCHIANI (L) 1973 : Acquisition et traitement en temps réel de données numériques d'analyses isotopiques d'azote par spectrométrie de masse. - Anal. Vol. 2 - N° 4 p.282-286.

GODEFROY (J) - ROOSE (E) 1970 : Estimation des pertes par lixiviation des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie de basse Côte d'Ivoire. Fruits - 25 - 6 - 403-420.

GODEFROY (J) 1974 : Evolution de la matière organique du sol sous culture du bananier et de l'ananas - Relations avec la structure et la capacité d'échange cationique - Thèse - Univ. de NANCY - 165p.

GRAFFIN (PT) 1971 : Etude intégrée de la décomposition d'apports organiques dans le sol. Evolution du carbone et de l'azote, liaison à la fraction minérale, modification des propriétés physiques - Am. Agron. 22 - 2 - 213-239.

GUIRAUD (G) - BERLIER (Y) 1969 : Etude avec N-15 de la dénitrification dans le sol, notamment en présence de paille enfouie.
Compt. rend. Acad. Agric. 14 - 1000-1007.

GADET (R) SOUBIES (L) 1962 : Le bilan de l'azote dans les sols -
Compt. rend. Acad. Agric. 3 - 145-153.

HANCK (RD) 1968 : Soil and fertilizer nitrogen - a review of recent work and commentary - Trans. 9 th Int. Cong. Soil Sci. II - pp.475-483.

HEBERT (J) 1968 : Croissance et développement des plantes. Besoins en éléments nutritifs - Bull. techn. d'information n° 231 - pp.525-532.

IRAT - 1972 : Synthèse des recherches poursuivies à l'IRAT relative à l'azote et aux aspects biologiques et organiques de la nutrition des plants.
IBADAN - 22 - 26 Mai 1972.

JONES (RW) - HELDIN (RA) 1970 : Ammonium, nitrite and nitrate accumulation in three Manitoba soils as influenced by added - Ammonium, sulfate and Urea -
Com. J. Soil Sci. 50 - 331-338.

JONES (MJ) - BROMFIELD (AR) 1970 : Nitrogen in the Rainfall at Samaru (NIGERIA)
Nature - Vol. 227 - N° 5253 - p.86.

KOCH (B) - EVANS (HJ) 1966 : Reduction of acetylene to ethylene by soibean root noduls - Pl. Physiol. 41 - 1748-1750.

KNOWLES - DOWNING - BARRET - 1965 : Determination of Kinetic constants for nitrifying bacteria in mixed culture with the aid of an electropic compunter - J. Gen. Microbiol. 38 - 2663 - 278

LADD (JN) - BUTLER (JHA) - 1964 : Comparaison of properties of synthetic and naturel humic acids.
FAO-AIEA - techn. Meeting. Braunschweig 1963.

LAUDELOUT et MEYER (J) 1954 : Les cycles d'éléments minéraux et de la matière organique en forêt équatoriale congolaise.
5 Congrès Int. Sci. Sol. 2 - 267-272.

LAUDELOUT - FRIPIAT - LAMBERT - PHAM - 1974 : Effet de la température sur la vitesse d'oxydation de NH4 en NO3 par des cultures mixtes de nitrifiants.
Ann. Microbiol. Inst. Pasteur. 125B - 75-84.

LAUDELOUT - LAMBERT - FRIPIAT - 1974 : Molar groth yield of nitrobacter winogradski dwing exponential growth.- Arch. Microbiol. - 98 - 127-131.

LAUDELOUT (H) 1976 : Rapport final sur la participation à un projet d'utilisation de l'azote isotopique en Côte d'Ivoire - Rapport 1134 - Assistance technique AIEA.

LAUDELOUT (H) - GERMAIN (L) - CHABALIER (PF) - CHIANG (C) 1975 : Loss of fertilizer Nitrogen through chemical - Decomposition of nitrite in Tropical Soils - Plant - Soil - à paraître.

LEFEVRE (G) et HIROUX (G) 1969 : Effet et arrière-effets sur blé d'une fumure azotée sur Ray grass d'ITALIE - Ann. Agron. 20 - 1 - 15-34.

LEMAIRE (F) 1972 : Etude des différents facteurs influençant la manifestation de l'effet spécifique de la matière organique sur les végétaux - Ann. Agron. 23 (I) 77-100.

LEMEE (G) 1967 : Investigations sur la minéralisation de l'azote et son évolution annuelle dans les humus forestiers in situ - Oecol. Plant. 2-4 -285-324.

LIBOIS (A) 1968 : Dynamique de l'azote minéral en sol nu - 19-2- 103-128.

LIVINGSTON (SD) et MOE (PG) 1969 : The effect of temperature and pH on the nitrogen composition of soil organic mattes extracts - Soil Sci. 107 - 2 - 108-113.

LONGUEVAL - 1976 : Influence d'apports combinés d'azote et de paille sur le statut azoté d'un sol ferrallitique malgache.
DEA - Univ. Sci. et techn. Languedoc. - Montpellier - 52p.

LOUE (A) 1967 : Fertilisation minérale du maïs. II- Diagnostic foliaire. Col. fert. sols - TANANARIVE - pp.560-567.

MOREL (R) 1968 : Evolution de l'azote et du carbone organique du sol au cours d'une expérience de longue durée - Ann. Agron. 19-2 - 153-174.

MOREL (R) 1969 : Essai de détermination quantitative relative à l'évolution de l'azote dans un sol cultivé en équilibre azoté - Ann. Agron. 20-2- 161-181.

MOREL (R) 1970 : Proposition nouvelle relative au problème de l'azote organique dans un sol en équilibre azoté - Ann. Agron. 21 - 2 - 197-210.

MOREL (R) 1971 : Evolution dans le temps de la quantité d'azote organique du sol. Sci. du sol 1 - 121-129.

MOREL (R) 1968 : Evolution de l'azote et du carbone organique du sol au cours d'une expérience de longue durée - Ann. Agron. 19 - 2 - 153-175.

MONOD (J) 1942 : Recherche dur la croissance des cultures bacteriennes - Hermann et Cie - PARIS.

MILLBANK (JW) 1959 : The physiology of nitrification in Kenya Highland soil Plant - Soil XI N° 4.

MOULINIER (H) 1969 : La minéralisation de l'azote dans un sol stérilisé par la vapeur et ses conséquences sur la fertilité - Bull. AFES -6 - 21-27.

MOUREAUX (C) 1967 : Influence de la température et de l'humidité sur les activités biologiques de quelques sols Ouest agricains. - Cah. ORSTOM - Ser. Pédol. - Vol. 4.

MULLER (J) 1965 : Observations sur les effets à long terme des fumures organiques et minérales sous climat méditerranéen I - Action sur les rendements. Ann. Agron. - 16 - 3 - 301-321.

MULLER (J) 1966 : Observations sur les effets à long terme des fumures organiques et minérales sous climat méditerranéen. II - Action sur le bilan de l'azote total du sol. Ann. Agron. 7 - 1 - 21-36.

MULLER (J) 1971 : Effets des amendements organiques, tourbes, écorces de résineux et des feuilles sur l'évolution de l'azote minéral. Compt. Rend. Acad. Agric. Fr. - 57 - 13 - 1123-1134.

MURATA (Y) 1961 : Studis on the photosynthesis of rice plants and its culture significance - Bull. Nath. Inst. Agr. Sci. D.S. 1 - 169.

NOMMIK (H) 1956 : Investigations on denitrification in soil - Acta Agric. Scand - VI - 2 - 195-228.

NGUYENKHA - DUCHAUFFOUR (PH) 1969 : Etude comparative de l'évolution de la matière organique du sol en conditions tempérées et tropicales - Pédologie XIX - 1 - 49-64.

NELSON (OW) - BREMNER (JM) 1969 : Factors affecting chemical transformations of nitrite in soil - Soil biol. Biochem. Vol 1.

OLIVER (R) - NGO CHAN BANG 1970 : Evolution de l'azote assimilable dans les sols Tropicaux - Agron. trop. XXV - 12 - 1069-1078.

OLIVER (R) 1973 : Evolution de l'azote engrais dans un sol ferrallitique des hautes terres malgaches - Non paru.

PERRAUD (A) 1971 : La matière organique des sols forestiers de la Côte d'Ivoire - Thèse d'état Fac. Sci. NANCY - 87p.

PATIL (SV) 1963 : The effect of urea - sulfate - and organic materiel on nitrite accumulation and gazeous loss of nitrogen in acid soil. Thèse - UTAH ST. Univ.

PATRICK (WH) - WYATT (R) 1964 : Soil Nitrogen loss as result of alternats submergence and Drying - SSSAP - 28 - 647-653.

RIVIERE (J) - FROUARD (Y) - catroux (G) 1970 : Influence d'enfouissements répétés de tiges de maïs sur la microflore bacterienne des sols. Ann. Agron. 21 - 4 - 403-420.

ROOSE (E) 1973 : Dix sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Thèse - Univ. d'ABIDJAN - Juin 1973 - 124p.

REUS (JD) 1963 : Nitrite réaction in soil - Thèse - UTAH - STATE - Univ.

REUS (JO) - SMITH (RL) 1965 : Chemical reaction of nitrite in Acid Soils SSSAP 29 - 267-270.

RASHID (MA) 1966 : The influence of organic matter and pH on transformations of nitrite to elemental N - Thèse - UTAH - ST. Univ.

ROOSE (E) - BERTRAND (R) 1972 : Importance relative de l'érosion, du ruissellement et du drainage oblique et vertical sous une savane arbustive de moyenne Côte d'Ivoire - Station IRAT - près de Bouaké. IRAT et ORSTOM.

ROOSE (E) - TALINEAU (JC) 1973 : Influence du niveau de fertilisation sur le bilan des éléments nutritifs majeurs de deux plantes fourragères cultivées sur un sol sableux de basse Côte d'Ivoire - ORSTOM - RCI - Doc. Ronéo.

SABEY (BR) 1969 : Influence of soil moisture tension on nitrate accumulation in soils - Soil - Sci. Amer. Proc. 33 - 2 - 263-266.

SIMON (G) 1960 : L'enfouissement des pailles dans le sol. Etude générale et répercussion sur la microflore du sol. - Ann. Agron. I - 5 - 53 - et II, 177-219.

SIMS (JL) - FREDERICK (LR) 1970 : Nitrogen immobilisation and décomposition of corn residus particule size - Soil - Sci. - 109 - 6 - 355-361.

STANFORD (G) 1968 : Extractable organic nitrogen and nitrogen mineralization in soils- Soil - Sci. 106 - 5 - 345-351.

SMITH (DH) - CLARK (FE) 1960 : Volatile losses of N from acid or neutral soils or solutions conteining NO2 and NH4 ions - Soil - Sci. 90 - 86-92.

SOUBIES (L) - GADET (R) - LEMAIN (M) 1962 : Possibilité de contrôler dans le sol la transformation de l'azote ammonical en azote nitrique. Comp. Rend. Acad. Agric. Novembre pp. 798-803.

STOJANOVIC - ALEXANDER 1957 : Effect of in organic nitrogen on nitrification - Thèse - Cornell. University.

STANFORD (G) - LEGG (JO) - SMITH (SJ) 1973 : Soil nitrogen availability evaluations based on nitrogen mineralisation potentials of soils and uptake of labeled and unlabeled nitrogen by plants. Pl. Soil - V.39-1- 113-125.

TANAKA - KAWAND - VAMAGUCHI 1966 : IRRI - Technical - Bull. 7.

TAKEDA (T) 1961 : Studies on the photosynthesis and production of dry matter in the community of rice plants Jap. JBot. 17 - 403-437.

TANAKA - KAWAWA - YAMAGUCHI - 1966 : Technical - Bull. 7 - IRRI.

TSUMODA (S) 1965 : Leaf character and nitrogen response - Proc. Symp. Min. Nutr. Rice Plant - 401-418.

VAN PRAAG (HJ) - BRIGODE (N) 1973 : Cycle interne de l'azote et du soufre dans les horizons humifères forestiers des sols bruns acides - Plant - Soil. 39 - N° 1 - 35-61.

VANCLEEMPUT (O) 1971 : Etude de la dénitrification dans le sol - Pédol. XXI - 3 - 367-376 - Gand.

WISLER (J) : DELWICHE (CC) 1954 : Investigations on the denitrifying process in soil- Plant and Soil - V n° 2.

VAN BULOW (JFW) - DOBEREINER (J) 1975 : Potential for Nitrogen fixation in Maize genetyps in Brazil - Biol. Nitr. Fixation in forming syst. of humic tropics - 20 - 23 Oct. IITA - Nigéria.

WEINHARD (P) - BALANDREAU (J) - RINAUDO (G) - DOMMERGUES (Y) 1971 : Fixation non symbiotique de l'azote dans la rhizosphère de quelques non légumineuses tropicales - Rev. Ecol. Biol. Sol - 3 - 367-373.

WAGNER (BH) - SMITH (GE) 1958 : N losses from soils fertilized with different nitrogen carriers - Soil - Sci. - 85 - 125-129.

WULLSTEIN (L) - GILMOUR (E) 1964 : Non - enzymatic gazeous loss of NO2 from clay and soil system - These - Oregon State - Univ.

WULLSTEIN (LH) 1967 : Soil Nitrogen volatilisation - A case of Applied Research - Agric. Sci. Review.

WATANABE - KUK KI LEE 1975 : Non symbiotic Nitrogen fixation in Rice and Rice Paddis - Biol. Nitr. fixation in forming syst. of humic tropics. 20 - 23 Oct. IITA-Nigéria.

YOSHIDA (T) - ANCAJAS (RR) 1971 : Nitrogen fixation by bacteria in the root zone of rice - Soil - Soc. Amer. Proc.- 35 - 156-157.

Sol ferralitique moyennement désaturé, rajeuni, remanié sur granite

Profil de BOUAKE (près de la fosse lysimétrique)

Horizon 0-20 cm.

Sec, brun foncé (5 YR 3/3) et sans tâche, à matière organique directement décelable - Aucune effervescence - Teneur approximative en éléments grossiers 15 %, gravier et gravillons de forme arrondie - Texture LAS à sable grossier et siliceux - Structure fragmentaire peu nette à éclats émoussés. Volume des vides faibles entre agrégats - Pas de fentes, agrégats à pores peu nombreux-poreux - Pas de faces luisantes - pas de faces de glissement - Matériau à consistance rigide et forte, cimenté peu plastique, peu collant, friable et peu fragile - Nombreuses racines, fines, moyennes à grosses, entre les agrégats et chevelu racinaire - Turricules et cavités, nombreux coprolithes, semelle de labour, trace de travail de sol, activité moyenne - Une transition très nette et régulière.

Horizon 20-80 cm.

Sec, brun (2,5YR 4/8) - Aucune effervescence avec des éléments ferrugineux, forme nodulaire - Teneur approximative en éléments grossiers 70% - Graviers abondants, gravillons très abondants, blocs de quartz - Texture LAS à sable grossier et siliceux - Structure massive, à éclats angul eux, polyédrique subanguleuse et grossière - Pas de fentes, agrégats à pores nombreux, moyens et larges, tubulaires, sans orientation dominante, poreux - quelques faces luisantes, pas de faces de glissement, revêtements organo-argileux, revêtements sesquioxydiques minces, sur les grains du squelette associés à des vides. Matériau à consistance rigide et fortement cimenté, non plastique, peu plastique ou peu collant, friable et peu fragile - Quelques racines fines entre les agrégats pas de chevelu - Turricules et cavités, quelques cavités, termitières hypogées - Activité faible, transition nette et irrégulière.

Horizon 80 cm.

Sec ocre jaunâtre humide (7,5YR 5/6), des taches, étendues et liées aux faces des unités structurales et sont associées aux éléments grossiers, irrégulières, entrainées sans orientation préférentielle - Hétérogénéité dans les dimensions, avec des limites très nettes, contrastées, aucune effervescence - Mais des éléments ferrugineux, en taches ferrugineuses - Teneur approximative en éléments grossiers 70 % - Graviers abondants, graviers très abondants, cailloux très abondants, peu de blocs - de roches sédimentaires détritiques, de forme irrégulière - A arêtes anguleuses, présence de gros micas blancs, Texture LAS à sable grossier siliceux - Structure massive à éclats anguleux, polyédrique subanguleuse, très grossière - Volume des vides très faible entre agrégats, meuble - Pas de fentes - Agrégats à pores nombreux, moyens et larges, tubulaires - Sans orientation dominante, très poreux -

Faces luisantes, pas de faces de glissements, revêtements organo-argileux - revêtements sesquioxydiques, minces - sur les grains du squelette associés à des vides - Matériau à consistance rigide, fortement cimenté, peu plastique et peu collant - friable, peu fragile, peu de racines, activités nulles.

Profil des fosses lysimétriques - BOUAKE

Sol prélevé en Janvier 1973

	Profondeur cm	0 - 20	20 - 80	80
Texture	Eléments grossiers	20 %	80 %	30 %
	Argile %	26,2	34,2	9,1
	Limon	7,7	5,5	5,2
	Sable très fin	3,8	4,3	6,0
	Sable fin	14,8	14,4	16,9
	Sable grossier	45,6	41,6	63,2
	M.O. %	2,52	1,45	0,42
	C	1,40	0,84	0,24
	N total	1,20	0,67	0,19
	C/N		12	12
ppm	P205 total	594	274	158
	P205 olsen	7		0
Complexe absorbant	Ca meq %	3,6	1,65	1,15
	Mg "	1,3	0,50	0,16
	K "	0,6	0,09	0,04
	Na "	0,05	0,02	0,01
	S "	5,55	2,50	1,35
	CeC "	10,8	9,1	4,57
	$V = \frac{S}{CEC}$ %	50	24	30 %
	PH eau	5,5	5,3	5,15
	pH Kcl		4,35	4,37
Triacide %	SiO2/Al2O3		1,80	1,60
	SiO2 ins.		420	374
	SiO2 sol.		200	247
	F2O3		53	61
	Al2O3		217	226
	CaO		0,78	0,60
	MgO		1,68	1,05
	K2O		1,05	1,05
	Na2O		0,90	0,78
	Perte au feu		94,6	92,0

Sol ferrallitique moyennement désaturé rajeuni remanié sur granite migmatitique.

Profil de GAGNOA (près de la fosse lysimétrique)

- sur versant pente 3 %
- sous maïs cultivé
- roche mère : altérite de granitoïdes.

- Horizon de 0-25 cm.

Humide, 10 YR 4/3, brun jaunâtre, foncé, sans tache - Matière organique directement décelable, aucune effervescence - Teneur approximative en éléments grossiers 0-5% - Approximativement 15-25% d'argile - Texture LAS à sable grossier - Structure massive, à éclats émoussés - meuble - Pas de fente - Poreux - Pas de face luisante - Pas de face de glissement - Matériau à consistance semi-rigide - Non cimenté, peu plastique, peu collant, friable, à très friable - Nombreuses racines - Activité moyenne - Transition nette.

- Horizon de 25-60 cm.

Humide, 10 YR 5/6 brun jaunâtre, sans tache - A matière organique non directement décelable, aucune effervescence - Teneur approximative en éléments grossiers 10 %, gravillons et quartz - Approximativement 30-40% d'argile - Texture AS - A sable grossier - Structure massive, à éclats émoussés, cohérent- Fentes à l'état sec - Poreux - Pas de face luisante - Pas de face de glissement - Matériau à consistance malléable - Non cimenté, plastique, collant, friable - Activité moyenne, quelques racines - Transition graduelle.

- Horizon de 60-90 cm.

Humide, 10 YR 6/6 jaune brunâtre - Sans tache, non organique, aucune effervescence - Teneur approximative en éléments grossiers 10 % - Approximativement 40 % d'argile - Texture AS, à sable grossier - Structure massive, à éclats émoussés, cohérent - Pas de fente - Poreux - Pas de face luisante - Pas de face de glissement - Matériau à consistance pâteuse - Non cimenté, plastique, collant, non friable, peu fragile - Quelques racines - Activité faible - Transition nette.

- Horizon de 90-120 cm.

Humide, 10 YR 6/8, jaune brunâtre - Très nombreuses taches - Couleur des taches 5 YR 5/8 - Rouge jaunâtre, non liées aux autres caractères - Apparemment non organique - aucune effervescence - Teneur - Approximative en éléments grossiers 10 %/30 % d'argile - Texture AS à sable grossier - Structure massive - A éclats émoussés - cohérent - Pas de fente - Poreux - Pas de face de glissement - Revêtements argilo-ferrugineux - Matériau à consistance pâteuse - Non cimenté, plastique, collant, peu friable, peu fragile - Pas de racines - Activité nulle ou très faible.

- Horizon 120 cm.

Et plus/nappe de gravillons ferrugineux - 80% d'éléments grossiers avec quelques débris de cuirasses.

Caractéristiques analytiques du sol de GAGNOA.

Profil lysimétrique.

	0-25 cm	25-90 cm	90 cm
Couleur texture	Brun LAS	Jaune AS	Jaune+taches rouilles LAS
A	26	46	27
L	4	4	4
Lg	4	3	4
Sf	30	20	30
Sg	35	27	34
pH	5,4	5,0	5,4
C	1,22	0,55	0,42
C/N	8	9	8
P205 T.	295	182	245
Ech. Ca	4,08	2,4	1,4
Ech. Mg	0,5	0,3	0,7
Ech. K	0,06	0,05	0,04
Ech. Na	0,01	0,01	0,01
Smeq %	4,66	2,76	2,18
CEC	9,4	4,8	5,4
V	49	57	40
SiO2 insol.	676	685	383
SiO2 sol.	121	106	243
Fe 203	27	27	54
Al 203	97	104	216
CaO	1,45	1,43	0,81
MgO	0,85	0,76	1,17
Na2O	0,94	0,55	1,13
K2O	0,67	0,48	0,85

TABLEAU n° 1 - FORMES D'AZOTE DU SOL - ESSAI PAILLE N - PRELEVEMENT REALISE LE 16-1-74

APRES CULTURE DE RIZ

Essai "Azote - Paille" Bouaké.

		N SOL MIN.						N hydrolysable distillable					N hydrolysable non distillable				N non hydrolysable					Somme des formes	
		N ppm	E %	N % NH4	N % NO3	QN 15% NH4	QN 15% NO3	N ppm	E %	QN15	N%	QN 15%	N ppm	QN 15 %	N%	QN 15%	N ppm	E %	QN15	N %	QN 15 %	N ppm	QN15
Sp B	MoN1	45	0,024	4	2	2	1	308	0,059	18,2	43	38	161	21,2	22	44	198,8	0,038	7,6	28	16	712	48
	MoN2	49,0	0,037	4	2	2	1	318,5	0,076	24,2	37	34	290,5	36,7	34	52	193,2	0,046	8,9	23	12	851	71,6
	M1N1	30,0	0,043	3	1	2	4	311,5	0,059	18,3	35	37	360,5	2,9	41	43	186,2	0,028	6,5	21	13	888	47,9
	M1N2	27	0,019	2	1	1	0,2	262,5	0,062	16,3	28	27	472,5	35,2	50	58,5	180,0	0,045	8,1	19	13	942	60,1
Sp A	MoN1	40	0,041	4	2	3	1	245	0,054	13,2	36	35	190	13,6	28	36	208,6	0,046	9,6	30	25	683	38,0
	MoN2	50	0,020	4	2	1	0,5	252	0,074	18,6	29	26	392	47,1	44	64	189	0,035	6,6	21	9	883	73,3
	M1N1	35	0,006	2	1	1	0,5	266	0,060	16	25	25	427	37,4	48	60	154	0,06	9,0	18	14	882	62
	M1N2	45	0,008	3	1	1	0,7	290,5	0,051	14,8	34	26	431	37,1	50	66	126	0,033	4,2	14	7	855	56,4

Tableau n° 2.

EFFET DES TRAITEMENTS AGRONOMIQUES SUR LES FORMES D'AZOTE - ESSAI DE CULTURE EN VASE

- BOUAKE -

		FORMES DE N DU SOL													RESULTATS PLANTE		
		AVANT CULTURE EN VASES						APRES CULTURE							Pds récolte	N exp.	N15 exp.
		C %	N min. ppm	N dist ppm	N non dist. ppm	N non hydrol	NT ppm	N dist. ppm	E %	N non dist. ppm	E %	N culot ppm	E %	NT ppm	mg/v.	mg/v.	mg/v.
Mo	No	1,32	25	241	444	156	842	262	0,08	475	0,116	132	0,03	869	1579	14,7	0,315
	N1	1,27	28	227	437	155	819	234	0,08	459	0,12	127	0,03	820	1650	14,9	0,318
	N2	1,36	27	247	419	156	819	256	0,08	507	0,12	137	0,03	900	1664	15,1	0,314
M1	No	1,33	28	246	438	170	834	251	0,08	517	0,12	154	0,04	922	1769	15,6	0,330
	N1	1,39	32	254	448	179	881	236	0,08	546	0,11	160	0,03	942	1708	15,3	0,326
	N2	1,33	32	249	465	165	878	239	0,08	520	0,12	155	0,04	914	1657	15,4	0,320
Moyenne		1,34	28	244	442	163	845	246	0,08	504	0,12	143	0,03	894	1672	15,2	0,321
CV %		9,2	21	10	10	10	9	12	10	11	10	20	18	-	12%	7,2	7,9
F calculé		0,6	1,5	0,8	0,6	1,9	0,8	0,5	0,4	2,1	0,5	1,2	0,3	-	1	0,5	0,24

F théorique à 5 % = 2,6

Poids récolte = feuille + racine

N exporté en mg/vase.

Tableau n° 3.

EFFET DES TRAITEMENTS AGRONOMIQUES SUR LES FORMES D'AZOTE - ESSAI DE CULTURE EN VASES

- GAGNOA -

		FORMES D'AZOTE DU SOL															ANALYSE DE PLANTE		
		AVANT CULTURE EN VASES						APRES CULTURE EN VASES									Récolte Pds total	Exp. total N	N15 exp.
		C %	N min ppm	N dist ppm	N non dist. ppm	N non hydrol	NT ppm	N dist. ppm	N dist. E %	N non dist. ppm	N non dist. E %	N non hydrol ppm	N non hydrol E %	NT ppm	NT E %	N15 total	mg/v.	mg/v.	mg/v.
Mo	No	0,89	18	291	430	140	879	284	0,43	269	0,47	148	0,42	707	0,46	0,093	1291	14,9	0,354
	N4	0,91	18	287	387	138	830	266	0,44	258	0,48	135	0,42	663	0,47	0,094	1224	15,3	0,356
M1	No	1,15	21	303	465	195	979	304	0,44	255	0,48	191	0,42	745	0,46	0,094	1384	16,2	0,379
	N4	1,08	20	330	450	191	990	311	0,44	271	0,47	179	0,42	766	0,46	0,096	1420	17,1	0,379
Moy.		1,01	19,25	302,75	440,50	166,00	917,5	291,25	0,44	261,75	0,48	163,25	0,42	720,25	0,46	0,094	1331	15,88	0,365

Remarque : L'interprétation statistique a mis en jeu d'autres traitements et n'est pas représentée ici. (Al- ZAHAWE 1976).

TABLEAU 4

Energies d'activation utilisées pour le calcul de la cinétique de nitrification à diverses températures.

Expressions relatives à..	Paramètres	Energie d'activation Kcal.Mole-1	Ateurs
Nitrosomonas	K_c	14,1	KNOWLES (1965)
	C_1	17,4	"
	A	19,7	LAUDELOUT(1974)
	K_m	17,4	"
Nitrobacter	K_c	8,7	LAUDELOUT(1974)
	C_1	21,5	"
	A	9,8	" (1960a)
	K_m	19,5	"
Ammonification	K_c	15,0	" (1960b)
Réduction chimique	K_1	12,3	GERMAIN (1975)

Tableau n° 5.

MODELE MATHEMATIQUE PROPOSE.

```
MODOT    =  -  KDEC    *  MO  -

NSDOT    =     KNS     *  CNH4    *  NRNS/(C1NS   +  CNH4)

NBDOT    =     KNB     *  CNO2    *  NRNB/(C1NB   +  CNO2)

CNH4     =   (- ASNS  *  NRNS    *  CNH4/(KMNS   + CNH4))  [+(KDEC * MO)
                                                          [+(-     MODOT)

                perte  (oxydation)          gain  (production)
                perte  (oxydation)          dénitrific. chimique

CNO2D    =   (- ASNB * NRNB * CNO2/(KMNB + CNO2) ) + (- K * CNO2  )

                 + ( ASNS * NRNS * CNH4/(KMNS + CNH4) )

                                gain  (oxydation NH4)

            MO       =  INTGRL   (IMO,  MODOT)

            PRODN    =  IMO    -  MO

            NRNS     =  INTGRL   (INRNS,  NSDOT)

            NRNB     =  INTGRL   (INRNB,  NBDOT)

            CNH4     =  INTGRL   (ICNH4,  CNH4D)

            CBNO2    =  INTGRL   (ICNO2,  CNO2D)

            CNO2     =  INSN     (CBNO2,  ICNO2,  CBNO2)

CNO3  =  ICNO3  +  ICNH4  +  ICNO2  +  PRODN  -  CNH4  -  CNO2
```

Tableau n° 6.
SIGNIFICATION DES SYMBOLES.

$C^{M.O.}$ = concentration en Ntot minéralisable au temps t

K^{o} = la constante cinétique de décomposition de la matière organique

N^{Ns}, N^{Nb} = nombre de Nitrosomonas et de Nitrobacter au temps t

K^{Ns}, K^{Nb} = taux de croissance de Ns et de Nb (le taux est maximal)

$C1^{Ns}$, $C1^{Nb}$ = constante de Monod relative à la croissance de Ns et de Nb

Km^{Ns}, Km^{Nb} = constante de Michaelis par l'oxydation de l'N ammoniacal et de l'N nitreux.

A^{*}_{Ns}, A^{*}_{Nb} = activité spécifique de Ns et de Nb ; cette activité est $\pm$ égale à $V_m Ns$, $V_m Nb$ c.à.d. à la vitesse maximale du système enzymatique de Ns et Nb au temps t, pour l'oxydation des espèces N ; et Vm est un paramètre carct. de l'équation de Michaelis.

$C_{NH4}(t)$ $C_{NO2}(t)$ = concentration en N-NH4 et N-NO2 au temps t

K^{NO2} = constante cinétique de décomposition du nitrite en azote gazeux.

Tableau n° 7.

Formation du modèle de cinétiques utilisé

Décomposition de la matière organique = MODOT

$$\frac{dCmo}{dt} = - KoCmo$$

Croissance de la population de Nitrosomonas = NSDOT

$$\frac{dNns}{dt} = \frac{Kns \cdot Nns \cdot CNH4\ (t)}{C1NS + CNH4\ (t)}$$

Croissance de la population de Nitrobacter = NBDOT

$$\frac{dNnb}{dt} = \frac{KNb. \quad Nnb. \quad CNO2\ (t)}{C1Nb + CNO2\ (t)}$$

Vitesse d'oxydation de l'ammonium en nitrite = CNH4D*

$$\frac{dCnH4}{dt} = - \frac{\overset{*}{A}ns \cdot Nns \cdot CNH4\ (t)}{KmNs + CNH4\ (t)}$$

Vitesse (de décomposition du nitrite en N gazeux / d'oxydation du nitrite en nitrate) CNO2D

$$\frac{dCnO2}{dt} = \left(- \frac{\overset{*}{A}Nb \cdot Nnb \cdot CNO2\ (t)}{KmNb + CNO2\ (t)}\right) - (KnO2 \cdot CNO2)$$

en admettant que A = Vm = vitesse d'oxydation maximum des formes azotées, pour autant que le R molaire de croissance des nitrifiants soit constant dans le temps.

$$A^* = \frac{K}{R} \quad \text{avec} \quad K = - \frac{1}{n} \frac{dN}{dt} \quad \text{et} \quad R = - \frac{dN}{de}$$

$$\text{c.à.d.}\ A^* = \frac{- \frac{1}{n} \frac{dN}{dt}}{- \frac{dn}{de}} = + \frac{1}{n} \frac{de}{dt}$$

On voit donc que le Vm est évidemment lié au nombre de cellules, par la celation.

$$Vm - A^* = \frac{KN}{R} = - \frac{dC}{dt}$$

Tableau n° 8.

SYMBOLES ET UNITES.

Equations		Machine	Unités
Concentration initiale	CoNH4	ICNH4	$mM-l^{-1}$
	CoNO2	ICNO2	
	CoNO3	ICNO3	
	CoMo	IMO	
Population initiale	NoNs	INRNS	10^6 cell. l^{-1}
	NoNb	INRNB	
Constantes	KNs	KNS	$jour^{-1}$
	KNb	KNB	
	Ko	KDEC	
	NNO2	K	
Autres paramètres	RNs	RNS	10^9 cell. mM^{-1}
	RNb	RNB	
	KMNs	KMNS	mM. l^{-1}
	KMNb	KMNB	
	C1Ns	C1NS	mM. l^{-1}
	C1Nb	C1NB	
	*ANs	ASNS=KNS/RNS	mM. $jour^{-1}$ $cell.^{-1}$
		ASNB=KNB/RNB	
Les variables	$\frac{dNns}{dt}$	NSDOT	cell. l^{-1}
	$\frac{dNnb}{dt}$	NBDOT	cell. l^{-1}
	dCmO/dt	MODOT	mM. l^{-1}
	dCnH4/dt	CNH4D	mM. l^{-1}
	dCNO2/dt	CNO2D	mM. l^{-1}

Tableau n° 9.

Lysimètres - Bouaké 1973 Riz - Coefficient d'utilisation.

Résultats par cuve (0,31 m2)

		Paille M.S.	Grain M.S.	Q N Paille	QN-Grain	QN-total	E %	QN 15	QN 15 apport	Coeffic. Cu %
M1N1	L 1	118	24	0,93	0,37	1,30	1,732	0,022	0,09	24
M1N2	L 2	103	31	1,10	0,64	1,74	2,49	0,043	0,18	24
MoN1	L 3	132	16	0,91	0,29	1,27	1,730	0,022	0,09	24
MoN2	L 4	100	30	1,02	0,62	1,64	2,637	0,043	0,18	24
M1N1	L 5	143	47	0,97	0,77	1,74	1,585	0,028	0,09	31
M1N2	L 6	163	65	0,72	1,13	1,85	2,242	0,041	0,18	23
MoN1	L 7	155	57	0,62	0,94	1,56	1,470	0,023	0,09	26
MoN2	L 8	189	35	0,76	0,71	1,48	2,495	0,036	0,18	20
M1N1	L 9	164	41	0,85	0,63	1,48	1,520	0,022	0,09	24
MoN1	L10	113	40	0,85	0,66	1,51	1,897	0,028	0,09	31

	Mo	M1	Moy.
N1	26	27	26,5
N2	22	23	22,5
Moy.	24	25	24,5

Tableau n° 10.

Valeur des E % dans les percolats lysimétriques - BOUAKE.

			1 9 7 3							1 9 7 4						
		N° lys.	4-9	5-9	10-9	12-9	13-9	14-9	17-9	29-4	6-5	7-5	29-7	13-8	16-8	3-9
45cm	M1N1	L1	0,235	0,258	0,202	0,171	0,172	0,113	0,069	0,321	0,343	0,256	0,131	0,097	0,07	-
	MoN1	L3	0,83	0,661	0,402	0,234	0,214	0,211	0,132	0,311	0,237	0,237	-	-	-	0,091
	M1N1	L5	-	-	0,042	0,073	0,221	0,052	0,037	0,260	0,24	0,24	0,246	-	-	0,087
	MoN1	L7	0,049	0,236	0,269	0,282	0,266	0,112	0,111	0,233	0,238	0,236	-	0,111	0,109	0,085
80 cm	M1N1	L9	0,05	0,049	0,061	0,099	0,102	0,116	0,328	0,122	0,109	0,102	-	0,080	0,075	0,095
	MoN1	L10	0,127	0,130	0,167	0,289	0,273	0,302	0,285	0,167	0,129	0,155	-	0,100	0,104	0,078
45 cm	M1N2	L2	1,49	1,36	0,7	2,25	2,23	2,44	2,66	0,438	0,390	0,370	0,106	0,099	-	0,099
	MoN2	L4	1,50	1,40	1,25	1,027	1,02	0,846	0,609	0,535	0,477	0,525	0,200	-	0,116	0,107
	M1N2	L6	1,36	1,23	0,64	2,08	2,08	1,51	0,704	0,397	0,398	0,396	-	0,120	-	0,01
	MoN2	L8	-	-	0,87	0,808	0,458	0,574	0,113	0,401	0,410	0,424	-	0,09	0,096	0,075

TABLEAU n° 11 - RESULTATS D'ANALYSES CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES - RIZ - 1973

Essai "Azote - Paille" - Bouaké.

		Sp A 24-7-73		Sp A 20-8-73		Sp A 10-9-73		Sp A 28-9-73		Sp A 28-9-73		Sp A 24-10-73 Paille		Sp A 24-10-73 Grain		Sp B 25-10-73 Paille		Sp B 25-10-73 Grain	
		N %	E %	N %	E %	N %	E %	N %	E %	N %	E %	N %	E %	N %	E %	N %	E %	N %	E %
Sans paille	N0	2,85	0,024	2,25	0,039	1,58	0,014	1,00	0,028	0,97	0,047	0,77	0,046	1,28	0,038	0,82	0,032	1,27	0,03
	N1	2,93	0,130	2,54	0,198	2,28	0,141	1,59	0,123	1,34	0,190	1,05	0,098	1,66	0,138	1,12	0,182	1,63	0,23
	N2	3,04	0,192	2,75	0,197	2,58	0,180	1,79	0,211	1,62	0,288	1,18	0,155	1,77	0,161	1,24	0,287	1,79	0,34
Avec paille	N0	2,92	0,038	2,18	0,017	1,58	0,010	0,95	0,036	0,97	0,029	0,80	0,042	1,29	0,027	0,74	0,041	1,27	0,04
	N1	3,00	0,117	2,24	0,178	2,13	0,111	1,32	0,102	1,14	0,232	1,04	0,123	1,63	0,103	1,06	0,187	1,69	0,20
	N2	3,02	0,157	2,69	0,161	2,37	0,162	1,79	0,180	1,60	0,252	1,12	0,145	1,71	0,149	1,21	0,262	1,80	0,30
Coefficient de variation %		4,57	45	8,81	43	10,7	19	11,8	35	12,0	34,0	10,2	27,8	6,4	36,5	9,6	9,5	7,00	33,0
F calculés Traitements		1,64	8,708*	8,14*	10,19*	20,90*	66,24*	30,67*	17,29*	21,89*	0,98	16,94*	14,62*	28,64*	11,8*	25,89*	26,55*	29,74*	2,0
Azote				17,19*		50,22*		72,59*		52,27*	1,16	41,60*		70,90*		62,93*	77,33*	73,78*	2,7
Paille				3,82		2,50		3,43		1,77	0,18	0,15		0,67		3,26	0,80	0,46	3,1
Interaction				1,24		0,74		2,37		1,57	1,60	0,67		0,36		0,16	1,52	0,33	0,3
N linéaire				33,22*		95,20*		43,68*		43,68*		03,76*		78,79*		27,39*		36,55*	
N quadratique				1,17		5,24		1,49		0,78		4,40		4,41		6,67		11,02	
											(N)						(N)		(N)

(N) interprétation faite avec N1 et N2 seulement.

TABLEAU n° 12 - RESULTATS AGRONOMIQUES - RIZ - 1973

Essai "Azote - Paille" - Bouaké.

		Rendts/parcelles 60 m2			Prél. mat. sèche en g/m2				Comptages nb talles/pied		Rendts sur sous-parcelles 15 N			
		Grains kg/ha	Paille kg/ha	Poids de 1000 grains	24-7	20-8	10-9	28-9	16-7	14-8	Grains g/3,20m2 Sp A	Grains g/3,20m2 Sp B	Pailles g/3,20m2 Sp A	Pailles g/3,20m2 Sp B
Sans paille	N_0	1063	3003	28,0	61,8	187,2	308,8	538,0	2,58	4,18	390,4	340,2	792	658
	N_1	1203	3753	26,3	67,7	189,2	409,2	637,7	2,77	4,60	371,2	385,6	949	973
	N_2	1020	5667	24,0	69,3	208,3	481,0	739,2	2,84	4,47	314,8	262,4	1144	1085
Avec paille	N_0	1480	4440	28,8	69,7	207,8	370,6	644,7	2,46	4,48	583,2	574,2	1158	950
	N_1	1463	5090	26,0	71,8	231,2	425,4	787,3	2,66	4,34	454,4	496,2	780	1128
	N_2	910	5060	25,7	64,3	292,7	499,2	818,5	2,90	4,59	407,0	401,6	1045	1184
Coefficient de variation		25,3	27,9	5,9	16,4	36,5	16,0	17,1	8,53	7,2	20,8	25,6	18,4	12,9
F calculés		5 blocs	5 blocs	5 blocs	6 blocs	6 blocs	5 blocs	6 blocs	6 blocs	6 blocs	5 blocs	5 blocs	5 blocs	5 blocs
Traitements		3,10*	3,06	6,10*	0,67	1,44	5,62*	4,45*	3,07*	1,48	5,53*	5,58*	3,45*	10,72**
Azote		4,27*		13,37**			12,81**	7,93*	6,82*		5,24*	4,19*	3,27*	17,81**
Paille		2,94*		1,60			1,74	6,26*	0,54		14,78**	17,63**	0,20	14,98**
Interaction		2,01		1,08			0,37	0,69	0,58		1,21	0,94	5,24*	1,49
N linéaire		5,17*		26,11*			25,60*	14,71*	13,58*		10,37*	7,08*		32,94*
N quadratique		3,39*		0,63			0,09	1,15	0,05		0,11	1,29		2,67

* = significatif ** = hautement significatif

Tableau n° 13.

Mobilisation d'azote - Essai "Azote - Paille" Bouaké 1973

g/m2	Sp A			Récolte						
				Sp A		Sp B		60 m2		
24/7	20/8	10/9	28/9	P	G	P	G	P	G	T1
1,75	4,26	4,96	5,40	1,85	1,49	1,60	1,24	2,37	1,58	3,95
2,00	4,78	9,44	10,30	3,47	1,91	3,40	1,92	3,70	2,33	6,03
2,10	5,68	12,44	13,29	4,09	1,67	4,14	1,47	6,55	2,03	8,58
2,05	4,55	6,07	6,10	2,70	2,16	2,15	2,28	3,68	2,11	5,79
2,15	5,17	8,91	10,43	2,50	2,20	3,60	2,57	4,96	2,63	7,59
1,93	7,85	11,65	14,66	3,55	2,15	4,37	2,27	5,46	1,86	7,32

Rendement en matière sèche

g/m2				Récolte						
				Sp A		Sp B		60 m2		
24/7	20/8	10/9	28/9	P	G	P	G	P	G	T1
61,8	187,2	316,8	538,0	247,5	122,0	205,6	106,3	300	106	406
67,7	189,2	398,3	673,7	296,5	116,0	304,0	120,5	375	120	495
69,3	208,7	452,2	739,2	357,5	98,4	339,0	82,0	566	102	668
69,7	207,8	385,5	644,7	361,8	182,2	290,8	179,4	144	148	592
71,8	231,2	425,4	787,3	243,7	142,0	352,5	155,0	509	146	655
64,3	292,2	510,8	818,5	326,7	127,2	370,0	125,5	506	91	597

TABLEAU N° 14 - COEFFICIENTS D'UTILISATION DE L'AZOTE ENGRAIS.

Essai "Azote - Paille" Bouaké 1973

1/ Premier apport d'azote

	Prélèvements en cours de végétation				Récolte sous-parcelle			Récolte parcelle 60m2		
	24/7	20/8	10/9	28/9	Paille	Grain	Total	Paille	Grain	Total
MoN1	7,24	29,56	40,23	41,18	10,0	7,93	17,96	12,25	7,97	20,22
MoN2	5,73	23,31	33,74	43,56	12,38	4,01	16,40	16,46	4,20	20,66
M1N1	7,84	24,51	32,45	33,62	8,54	6,66	15,21	20,66	7,11	27,77
M1N2	4,76	28,76	30,87	38,82	9,05	5,19	14,24	13,01	3,36	16,37

2/ Second apport d'azote

	Prélèvements du	Récolte sous-parcelle			Récolte parcelle 60 m2		
	28/9	Paille	Grain	Total	Paille	Grain	Total
MoN1	59,78	19,99	15,02	35,02	24,28	13,24	37,52
MoN2	55,84	19,25	12,09	31,35	32,01	9,01	41,02
M1N1	62,6	21,65	15,91	37,55	32,00	14,63	46,63
M1N2	52,46	18,35	10,11	28,46	25,46	7,11	32,56

TABLEAU N°15 - CONTRIBUTION DE L'ENGRAIS A LA NUTRITION AZOTEE DU RIZ.

Résultats exprimés en pourcentages.

Essai "Azote - Paille" Bouaké.

1/ Premier apport.

	Prélèvements en cours de végétation				Récolte	
	24-7	20-8	10-9	28-9	Paille	Grain
MoN1	12,3	18,8	13,4	11,7	9,3	13,1
MoN2	18,3	18,7	17,1	20,0	14,7	15,3
M1N1	11,1	17,0	10,5	9,7	11,7	9,8
M1N2	14,9	15,3	15,4	17,1	13,8	14,1

2/ Deuxième apport.

	Prélèvement du 28-9	Récolte	
		P	G
MoN1	18,1	17,3	22,2
MoN2	27,4	27,3	32,5
M1N1	22,1	17,8	19,5
M1N2	24,0	24,9	28,5

TABLEAU n° 16 - RESULTATS AGRONOMIQUES - MAIS 1974

Essai "Azote - Paille" Bouaké

		Rendements/parcelles 60 m2 g/m2 Grain g/m2	Paille	Poids de 1000 grains	Prélèvements matière sèche g/m2 28-5	12-7	6-8	Hauteur en cm mesurée le 17-6	Rendements sous-parcelles 15 N (en g pour 6pieds) 1,2 m2 Grain Sp A	Sp B	Paille Sp A	Sp B
Mo	No	325	466	259	260	547	791	234	726	757	556	600
	N1	480	543	268	261	695	1023	247	997	939	632	700
	N2	419	543	258	317	661	962	231	1017	950	519	565
M1	No	400	536	271	307	725	936	252	839	658	614	545
	N1	515	610	282	311	718	1025	258	894	1099	549	696
	N2	454	656	284	275	722	1110	245	888	796	631	549
Coefficient de variation %		12.0	10	6	16	8	9	6	18	22	25	20
F calculé Traitements		9,86**	8,32**	2,6*	1,92	9,22**	11,33**	2,82*	2,68	4,08*	0,63	1,37
Azote		20,2**	10,69**	1,0	0,25	5,28**	18,81**	4,11*	4,33*	7,79*	0,03	2,05
Paille		7,72*	19,10**	9,7**	1,41	22,62**	18,0**	5,48*	0,57	0,23	0,34	0,04
Interaction		0,57	0,55	0,7	3,84	6,46	0,51	0,19	2,10	2,29	1,37	1,35
Bloc		3,45*	2,53	1,9	5,00	5,97**	3,70*	6,90**	1,85	1,52	1,70	3,49

TABLEAU N° 17 - COEFFICIENTS D'UTILISATION ET CONTRIBUTIONS DE L'ENGRAIS A L'ALIMENTATION AZOTEE DU MAIS

1/ Premier apport

	Prélèvement du 28-5				Prélèvement du 12-7				Grain				Paille				Total			
	QN	QN 15	Cr %	K %	QN	QN 15	Cr%	K %	QN	QN15	Cr %	K %	QN	QN 15	Cr %	K %	QN	QN 15	Cr %	K %
)NO	3,24	-	-	-	4,8	-	-	-	4,05	-	-	-	1,79	-	-	-	5,84	-	-	-
)N1	5,40	1,548	30,5	27	9,81	1,875	36	18	8,55	1,34	26,8	16	3,96	1,00	20	21	12,51	2,34	46	18
)N2	8,02	2,838	28,4	35	11,22	2,877	28	29	7,83	2,13	21,3	27	4,91	1,67	16,7	33	12,80	3,80	38	29
)NO	4,32	-	-	-	5,46	-	-	-	5,51	-	-	-	2,14	-	-	-	7,65	-	-	-
)N1	6,74	1,812	35,7	24	9,26	1,72	34,5	18	9,05	1,35	27,0	15	4,32	0,77	15,4	17	13,37	2,12	42	16
)N2	7,01	2,830	28,3	37	13,70	3,150	31	22	8,70	2,13	21,3	24	6,03	1,68	16,8	26	14,73	3,81	38	25

2/ Second apport

	Prélèvement du 12-7				Grain				Paille				Total		
	QN	QN15	Cr %	K %	QN	QN 15	Cr%	K %	QN	QN 15	Cr%	K %	QN	QN 15	Cr %
NO	4,59	-	-	-	3,93	-	-	-	1,85	-	-	-	5,78	-	-
N1	9,78	1,31	29	12	8,44	1,70	34	20	3,72	0,477	9	13	12,16	2,17	43
N2	9,93	1,00	10	10	7,52	1,30	13	17	4,81	0,563	5	12	12,33	1,86	18
NO	5,10	-	-	-	4,83	-	-	-	2,13	-	-	-	6,96	-	-
N1	10,92	1,16	23	10	8,55	1,64	33	19	4,45	0,549	11	13	13,00	2,19	44
N2	12,75	1,62	16	13	8,50	1,50	15	17	6,01	0,779	7	13	14,51	2,27	22

TABLEAU n° 18 - RESULTATS D'ANALYSES CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES - MAIS 1974

Essai "Azote - Paille" - Bouaké.

		Sp A 28-5		Sp A 12-7		Sp B 12-7		Sp A 6-8 Grain		Sp A 6-8 Paille		Sp B 6-8 Grain		Sp B 6-8 Paille		Analyses foliaires 11-6				
		N %	E %	N %	E %	N %	E %	N %	E %	N %	E %	N %	E %	N %	E %	N	P	K	Ca	Mg
M0	N0	1,31	0,03	0,92	-	0,85	-	1,26	-	0,38	-	1,27	-	0,40	-	2,99	0,27	2,1	1,4	0,59
	N1	2,08	0,270	1,40	0,188	1,42	0,122	1,74	0,161	0,75	0,212	1,72	0,207	0,68	0,128	3,20	0,33	2,3	1,5	0,6
	N2	2,31	0,354	1,69	0,296	1,51	0,103	1,82	0,278	0,89	0,332	1,79	0,174	0,87	0,118	3,20	0,35	2,4	1,3	0,59
M1	N0	1,43	0,015	0,75	-	0,81	-	1,41	-	0,46	-	1,27	-	0,40	-	2,91	0,30	2,1	1,4	0,57
	N1	2,10	0,247	1,25	0,186	1,65	0,101	1,76	0,150	0,73	0,174	1,72	0,192	0,73	0,132	3,22	0,33	2,3	1,4	0,55
	N2	2,53	0,370	1,85	0,228	1,74	0,129	1,90	0,241	0,92	0,262	1,87	0,177	0,93	0,130	3,31	0,35	2,4	1,4	0,57
Coefficient de variation %		13	29	16	12	20	26	4	13	9	10	6,5	13	16	13	8	4,5	7	6,5	8
F calculé																				
Traitements		21,9**	37,5**	24,19**	19,13**	15,39**	1,30	74,71**	33,26**	81,45**	38,8**	38,44**	2,03	26,9**	0,8	4,2**	31**	4,1**	3,3**	1,2
Azote		53,4**	93,0**	57,69**	39,02**	34,64**		177,75**	93,49**	203,17**	101,2**	95,12**	5,21	66**		9,9**	73**	10**	4,9*	-
Paille		1,8	1,26	0,12	7,57*	4,52*		10,28*	4,97*	0,05	15,0**	0,65	0,30	0,8		1,0	3	0,1	1,4	-
Interaction		0,50	0,15	2,72	10,80**	1,57		3,91*	1,30	0,43	0,28	0,65	0,59	0,2		0,1	3	0,1	2,6	-
Blocs		2,2	0,77	1,27	6,38**	0,60	0,53	2,73*	1,73	1,11	1,9	0,60	0,58	1,0	0,8	0,8	1,7	1,8	6,4**	9,5**

TABLEAU n° 19 - ARRIERE EFFET DE LA FUMURE AZOTEE DU RIZ SUR LA CULTURE DU MAIS

Essai "Azote - Paille" - Bouaké.

			Sous-parcelles A premier apport							Sous-parcelles B deuxième apport						
	QN Paille	QN Grain	E % Paille	E % Grain	N 15 Paille	N15 Grain	N15 Total	Cr %	K %	E % Paille	E % Grain	N15 Paille	N15 Grain	N15 Total	Cr %	K %
MON1	3,72	8,44	0,160	0,149	0,59	1,25	1,84	6,1	1,5	0,180	0,191	0,67	1,60	2,27	7,5	1,8
MON2	4,81	7,52	0,235	0,265	1,13	1,99	3,12	5,2	2,5	0,260	0,279	1,25	2,09	3,34	5,6	2,7
MON1	4,45	8,55	0,167	0,177	0,74	1,51	2,25	7,5	1,7	0,190	0,163	0,84	1,39	2,23	7,4	1,8
MON2	6,01	8,50	0,181	0,149	1,08	1,26	2,34	3,9	1,7	0,220	0,184	1,32	1,56	2,88	4,8	2

Tableau n° 20.

Lysimètres Bouaké - Coefficient d'utilisation - Arrière effet de la fumure 1973 sur maïs

Trait.		Grains M.S.	N %	QN	Paille M.S.	N %	QN	QN_T	E %	QN_{15}	Cr
MON1	L 3	137,6	1,266	1,74	160	0,68	1,08	2,82	0,096	0,002	4,4
M1N1	L 1	143	1,770	2,53	180	0,68	1,22	3,75	0,084	0,003	6,7
MON2	L 4	140	1,758	2,46	160	0,85	1,36	3,82	0,135	0,005	6,0
M1N2	L 2	120,5	1,506	1,81	120	0,82	0,98	2,79	0,120	0,003	3,4
MON1	L 7	144	1,546	2,22	180	0,70	1,26	3,48	0,097	0,003	6,7
M1N1	L 5	110,8	1,938	2,14	160	0,70	1,12	3,26	0,116	0,003	6,7
MON2	L 8	137	1,854	2,53	180	0,87	1,56	4,09	0,143	0,005	6,0
M1N2	L 6	143,4	1,936	2,77	200	0,90	1,80	4,57	0,123	0,005	6,0
MON1	L10	133,7	1,652	2,20	160	0,68	1,08	3,28	0,110	0,003	6,7
M1N1	L 9	174,4	1,641	2,86	220	0,72	1,58	4,44	0,107	0,004	8,9

Cr	N1	N2	Moy.
MO	5,9	6,0	5,9
M1	7,5	4,6	6,0
Moy.	6,7	5,3	6,0

Lysimètres - Bouaké 1973. Tableau n° 21.

Bilan après culture.

Estimées : 93 kg terre dans 0-25 cm.

apports : N1 - 90 mg N-15

N2 - 100 mg N-15

N1 + 60 u en 2 fois

N2 + 120 u en 2 fois

Trait.	N° Lys.	N ppm	E %	QN 15	Cr Sol %	Cr plte %	Cr Total%	Observ.
M1	1	880	0,081	66	73	24	97	pertes 1%
Mo	3	870	0,070	56	62	24	86	"
M1	9	990	0,078	71	79	24	103	"
M1	5	990	0,078	64	71	31	102	"
Mo	7	940	0,080	69	77	26	103	"
Mo	10	930	0,062	53	59	31	90	"

N2 + 120 u en 2 fois

M1	2	920	0,118	100	55	24	79	pertes 4%
Mo	4	920	0,099	91	51	24	75	"
M1	6	1000	0,111	103	57	23	80	"
Mo	8	960	0,123	107	59	20	79	"

Tableau N° 21.bis

Arrière-effet de la fumure azotée sur lysimètres BOUAKE.

		1ère année 1973		2ème année 1974	
	Trait. N°	E %	C_r sol	E %	Cr sol
N1	M1 1	0,081	73	0,0520	58
	M1 9	0,078	79	0,0377	47
	M1 5	0,070	71	0,0331	42
	Mo 3	0,070	62	0,0433	41
	Mo 7	0,080	77	0,0256	31
	Mo 10	0,062	59	0,0293	31
	Moyenne		70		41,6
N2	M1 2	0,118	55	0,0403	22
	M1 6	0,111	57	0,0565	36
	Mo 4	0,099	51	0,0630	33
	Mo 8	0,123	59	0,0626	38
	Moyenne		55,5		32,2

Engrais marqué apporté en 1973 en 2 fois.

Tableau n° 22.

Résultats des lysimètres de Gagnoa.

Prélèvement après culture 73

Bilan d'engrais dans le sol (N-15) 0 - 30 cm.

Moy.	0 - 15 cm		15 - 30 cm		QN 15 0 -30	Cr % sol 0-30 cm
	N ‰	E %	N ‰	E %		
L1-L2	1,32	0,069	1,21	0,071	0,107	34 %
L3-L4	1,33	0,052	1,22	0,076	0,112	35

Estimation du poids de la terre dans les lysimètres (0,31 m2)

da de 0-15 = 1,4 kg/dm3 —— 65 kg de sol

da de 15-30 = 1,6 kg/dm3 —— 74 kg de sol

Total 0-30 139 kg.

Formes de l'azote du sol.

	N total	N minéral NH4 - NO3	N sol. dist. (Sucres aminés)	N sol non dist. (acides aminés)	N non hydrol. (azote stable)
ppm	1300 ppm	25 - 30	360	730	160
% de N	2	2 2	27	56	12

Tableau N° 23.

Essai Paille compost - GAGNOA - 1er cycle 74.

I - Rendement en grande parcelle (10,8 m2)

Grain Maïs :

M \ N	No	N1	
Mo	6,24	6,43	6,33
Mp	6,44	6,88	6,51
Mc	6,55	6,74	6,65
	6,55	6,74	6,65

Erreur	F.calc.	F. 0,05	
Trait.	0,84	2,59	NS
Bloc	4,83	2,59	HS
M.O.	1,94	3,37	HS
N	0,30	4,22	NS
M.O.xN	0,00	3,37	NS

CV = 15 %

Paille Maïs :

M \ N	No	N1	
Mo	5,188	5,978	5,583
Mp	5,486	6,575	6,839
Mc	6,785	8,333	7,659
	5,619	6,962	6,391

Erreur	F.calc.	F. 0,05	
Trait.	3,958	2,59	HS
Bloc	3,201	2,59	S
M.O.	6,648	3,37	HS
N	6,054	4,22	S
M.O.xN	0,227	3,37	NS

CV = 21,7 %

McN1	MpN2	MpN1	MpN1	McNo	McN1

Tableau n° 24.

Coefficient d'utilisation de l'engrais.

Essai Paille Compost.

Grain :

SI	Moyenne	=	21,4 %	SE	Moyenne	=	4,10 %
	C.V.	=	16 %		C.V.	=	21 %
	Effet T	=	NS		effet T	=	NS

Paille :

SI	Moyenne	=	9,3 %	SE	Moyenne	=	2,17 %
	C.V.	=	39 %		C.V.	=	40 %
	effet T	=	NS		effet T	=	NS

S = Sous-parcelle N-15

SI = Pieds intérieurs à la sous-parcelle

SE = Pieds extérieurs à la sous-parcelle.

Tableau n° 25.

Coefficent d'utilisation réelle de l'engrais.

Essai paille compost - Tableau récapitulatif.

		Paille			Grain			Plante		Sol			Total	
	Trait.	N %	Cr %	K %	N %	Cr %	K	Cr	K	N	Cr	K	Cr	K
I	MoN1	0,557	10	3,0	1,462	22,6	23	32	26,8	0,0597	48	2	85	32
	MpN1	0,563	8	2,5	1,458	22,0	21	30	23,5	0,0326	53	2	88	29,5
	MoN1	0,685	9	2,6	1,447	20,6	21	29	23,6	0,0657	53	2	86	30,6
E	MoN1	0,565	1	2	1,455	4,0	2	9	4					
	MpN1	0,567	1,0	2	1,475	4,0	2	5	4					
	MoN1	0,640	2,0	3	1,457	4,1	2	6	5					
I+E	MoN1		11	5		26	25	37	30					
	MpN1		9	4,3		26	23	35	27,5					
	MoN1		11	5,6		24	23	33	28,6					

Tableau N° 27.

Essai Azote-Paille - GAGNOA 1974 - 1er cycle.

I - Rendement en grande parcelle (28,8 m2)

Paille Maïs :

M \ N	No	N1	N2	
Mo	12,55	28,86	19,25	16,89
M1	11,34	15,52	15,81	13,96
M2	9,94	14,95	15,34	13,41
	11,28	16,44	16,53	14,75

Erreur	F.calc.	F.0,05	
Trait.	8,64	2,13	HS
Bloc	1,30	2,20	NS
M.O.	9,80	3,18	HS
N	23,33	3,10	HS
M.O.xN	8,53	2,56	NS

CV = 20,6 %

Duncan :

M2No M1No MoNo | M2N1 M1N2 M1N1 | MoN1 MoN2

Grain Maïs :

M \ N	No	N1	N2	
Mo	12,13	15,44	16,07	14,55
M1	13,76	14,61	14,50	14,29
M2	11,66	15,76	15,16	14,20
	12,85	15,28	14,91	14,3

Erreur	F. calc	F. 0,05	
Trait.	3,206	2,10	HS
M.O.	0,186	3,15	NS
Bloc	3,750	2,17	HS
N	9,698	3,15	HS
M.O.xN	1,471	2,52	NS

CV = 14,3 %

Duncan :

M2No MoNo M1No | M1N2 M1N1 MoN2 M2N2 MoN1 | M2N1

Tableau n° 28.

Coefficients d'utilisation de l'engrais.

Azote - Paille - GAGNOA 1/74.

GRAIN :

SAI	Moyenne	=	13,47 %	SBI	Moyenne	=	26,2 %
	C.V.	=	9,9 %		C.V.	=	18 %
	effet T.	=	NS		effet T.	=	NS
	effet B.	=	HS		effet B.	=	NS

Bloc IV	=	18 %
Bloc IVI et VII	=	12,3 %
Bloc VIII	=	9,8 %

SAE	Moyenne	=	3,13 %	SBE	Moyenne	=	11,6 %
	C.V.	=	30 %		C.V.	=	80 %

PAILLE :

SAI	Moyenne	=	6,35 %	SBI	Moyenne	=	10,4 %
	C.V.	=	35 %		C.V.	=	46 %
SAE	Moyenne	=	4,31 %	SBE	Moyenne	=	3,19 %
	C.V.	=	57 %		C.V.	=	47 %

Tableau n° 29.

Coefficient d'utilisation réel de l'engrais.

Essai Azote-paille - Tableau récapitulatif - GAGNOA.

(S.A)		Paille			Grain			Plante		Sol			Total	
	Trait.	N %	Cr	K	N %	Cr	K	Cr	K	N %	Cr	K	Cr	K
A I	MoN1	0,525	7,1	6,0	1,477	13	5,0	20,1	11	0,066	30	0,4	60,2	13,7
	MoN2	0,542	5,2	8,3	1,578	11	6,6	16,2	14,9	8,868	31	0,6	55	24,7
	M2N1	0,532	7,2	5,4	1,460	14	5,8	21,2	10,4	0,073	25	0,4	56,2	12,9
	M2N2	0,518	4,2	8,2	1,442	11	6,5	15,2	14,7	0,061	40	0,6	65,6	19,8
A E	MoN1	0,512	3,6	1,3	1,472	6,5	1,0	10,1	2,3					
	MoN2	0,562	6,5	4,7	1,617	1,3	4,6	7,8	9,2					
	M2N1	0,526	3,0	1,1	1,472	7,0	1,0	10	2,1					
	M2N2	0,534	4,2	3,5	1,456	6,2	1,0	18,4	4,5					
A I+E	MoN1		18,7	7,3		19,5	10	30,2	13,3					
	MoN2		11,7	13		12,3	12,4	24,6	26,8					
	M2N1		10,2	8,8		21	6	31,2	12,8					
	M2N2		8,4	11,7		17,2	7,5	25,6	19,2					

S.A. = Sous-parcelle recevant l'azote marqué au semis

AI = ligne intérieure recevant l'azote marqué

AE = 2 lignes antérieures adjacentes à la ligne de la sous-parcelle.

Tableau n° 30.

Coefficient d'utilisation réelle de l'engrais.

Essai "Azote-paille - Tableau récapitulatif.

(SB)		Paille			Grain			Plante		Sol			Total	
	Trait.	E %	Cr	K	E %	Cr	K	Cr	K	E %	Cr	K	Cr	K
BI	MoN1	0,500	10,0	7,6	1,690	90	10,0	40	17,6	0,070	52	0,5	107,6	21,2
	MoN2	0,560	10,0	13,4	1,422	20	16,1	34	29,5	0,073	44	0,5	88,5	35,9
	M2N1	0,612	12,4	7,2	1,580	21	10,0	32,4	17,2	0,098	48	0,4	94,4	20,8
	M2N2	0,595	10,3	14,2	1,500	23	15,1	33,3	29,3	0,089	41	0,6	83	34,1
BE	MoN1	0,510	3	1,1	1,583	12,6	2,0	15,6	3,1					
	MoN2	0,500	2,5	2,3	1,570	12,0	3,6	14,5	6					
	M2N1	0,497	5	2,0	1,392	8,0	1,2	13	3,2					
	M2N2	0,500	2	2,0	1,445	6,7	2,2	8,7	4,2					
B I+B	MoN1		13	8,7		42,6	12	55,6	20,7					
	MoN2		12,5	15,7		32	19,7	44,5	35,4					
	M2N1		17,4	9,2		29	11,2	46,4	20,4					
	M2N2		12,3	16,2		29,7	17,3	42	33,5					

Tableau n° 31

Essai Azote-Compost - GAGNOA 74 - 1er cycle.

I - Rendement en grande parcelle (27,60 m2)

Grain Maïs :

No \ Mo	Mo	M1	
No	10,70	14,28	12,49
N1	13,46	13,57	13,52
N2	13,41	14,55	13,98
N3	12,26	15,76	14,01
N4	11,13	15,82	13,48
N5	12,21	14,02	13,11
	12,19	14,57	13,43

Erreur	F.calc.	F. 0,05	
Trait.	6,04	1,93	HS
Bloc	2,10	2,14	NS
M.O.	1,48	2,35	NS
N	41,86	3,98	HS
M.O.xN	3,43	2,36	HS

CV = 13,9 %

Paille Maïs :

No \ M	Mo	M1	
No	6,49	6,72	6,01
N1	8,65	9,48	9,03
N2	8,76	7,76	8,26
N3	8,75	7,64	8,20
N4	8,50	7,80	8,15
N5	8,65	8,03	7,84
	8,13	7,89	8,01

Erreur	F.calc.	F. 0,05	
Trait.	3,12	1,93	NS
Bloc	2,10	2,14	HS
M.O.	8,82	2,35	HS
N	1,22	3,98	NS
M.O.xN	2,19	2,35	NS

CV = 13,3 %

Tableau nº 32.

Coefficients d'utilisation de l'engrais.

Essai - Azote-Compost - GAGNOA - 1/74

Grain :

SAI	Moyenne	=	14,21 %	SBI	Moyenne	=	29,84 %
	C.V.	=	21 %		C.V.	=	29 %
	effet trait.	=	NS		effet trait.	=	NS
	effet bloc	=	NS		effet bloc	=	NS
SAE	Moyenne	=	7,93 %	SBE	Moyenne	=	7,53 %
	C.V.	=	46 %		C.V.	=	36 %
	effet T.	=	NS		effet T.	=	NS
	effet B.	=	NS		effet B.	=	NS

Paille :

SAI	Moyenne	=	7,67 %	SBI	Moyenne	=	12,82 %
	C.V.	=	14 %		C.V.	=	55 %
	effet T.	=	NS		effet T.	=	NS
	" B.	=	NS		" B.	=	NS
SAE	Moyenne	=	2,49	SBE	Moyenne	=	1,93 %
	C.V.	=	39 %		C.V.	=	43 %
	effet T.	=	NS		effet T.	=	NS
	" B.	=	NS		" B.	=	NS

Tableau n° 33.

Essai Azote-compost - GAGNOA - Tableau récapitulatif.

SA		Paille			Grain			Plante		Sol			Total	
	Trait.	N %	Cr %	K	N	Cr	K	Cr	K %	N %	Cr	K	Cr	K
AI	MoN2	0,857	8	12	1,500	13	1	21	13	0,0762	45	0,9	78	17,1
	M142	0,567	7	10	1,566	16	1	23	9	0,0987	48	0,7	80	13,9
AE	MoN2	0,542	2	0,2	1,690	9	3	11	3,2					
	M1N2	0,607	2	0,2	1,560	7	2	9	4					
I+E	MoN2		10	12,2		22	4	32	16,2					
	M1N2		9	10,2		23	3	32	13,2					

SA = Sous-parcelle recevant l'azote marqué au semis

I = Ligne intérieure recevant l'engrais marqué

E = 2 lignes adjacentes à la ligne de la sous-parcelle.