

TH - HD 1-13

UNIVERSITE DE NANCY I
CENTRE DE PEDOLOGIE BIOLOGIQUE CNRS

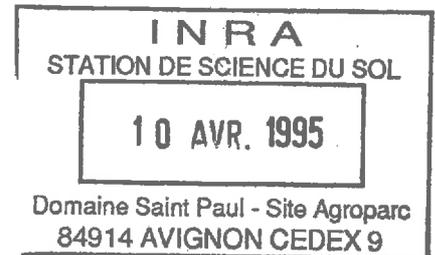
THESE

présentée par

Jean-Luc CHOTTE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Nancy I



**EVOLUTION D'UNE BIOMASSE RACINAIRE DOUBLEMENT
MARQUEE (^{14}C , ^{15}N) DANS UN SYSTEME SOL-PLANTE :
ETUDE SUR UN CYCLE ANNUEL D'UNE CULTURE DE MAÏS**

Soutenu le 7 février 1986, devant la Commission d'Examen

MM. HERBILLON A. : Professeur associé à l'Université de Nancy I.
LETOLLE R. : Professeur à l'Université de Paris VI.
VIAUX Ph. : Ingénieur à l'I.T.C.F.
ANDREUX F. : Chargé de Recherche au C.N.R.S.
GUIRAUD G. : Ingénieur au C.E.N. de Cadarache
HETIER J.M. : Chargé de Recherche au C.N.R.S.
LE TACON F. : Maître de Recherche à l'I.N.R.A.
SOUCHIER B. : Professeur à l'Université de Grenoble.

AVANT-PROPOS

Au terme de ce travail qui représente près de trois années de recherche au sein du Laboratoire de Fertilité des Sols du Service de Radioagronomie du Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache, je tiens à remercier les personnes qui m'ont dirigé et celles qui ont accepté de faire partie du jury.

- Monsieur le Professeur A. HERBILLON, directeur du Centre de Pédologie Biologique, qui me fait l'honneur de présider ce jury

- Monsieur le Professeur R. LETOLLE, qui a accepté de juger ce travail

- Monsieur le Professeur B. SOUCHIER, qui dans un premier temps m'a accueilli dans son laboratoire

- Monsieur F. LE TACON qui a examiné cette étude

- Monsieur J.M. HEIER, je suis tenté d'écrire, Jean-Marie, qui est à l'origine de ce travail et qui, par la suite, m'a conseillé et dont la collaboration m'a été très précieuse au moment crucial de la rédaction.

- Monsieur G. GUIRAUD, qui m'a apporté, outre son amitié, ses connaissances et a su me faire assimiler la rigueur utile à l'emploi de l'azote 15

- Monsieur F. ANDREUX en qui j'ai trouvé une aide appréciable et qui a représenté, durant ces années, le lien privilégié que j'ai pu avoir avec les chercheurs du Centre de Pédologie - Biologie.

- Monsieur P. VIAUX, qui m'a fait partager ses compétences agronomiques et qui a assuré avec l'I.T.C.F. et l'A.G.P.M. la réalisation financière de ce travail.

Il faut associer à ces remerciements

- Monsieur L. SAINT LEBE, Chef du Service de Radioagronomie qui m'a accueilli dans son service.

- Monsieur J.C. FARDEAU, dont les réflexions et les remarques m'ont permis d'acquérir la logique nécessaire à tout travail de recherche

Je tiens à renouveler toute mon amitié à Madame C. MAROL qui a eu la lourde tâche de m'initier aux techniques de l'azote 15.

Je ne saurais oublier Mademoiselle M.C. THIBAUD, qui m'a, non seulement, apporté sa collaboration pratique, mais aussi son aide au cours des réflexions qui ont marqué ce travail.

Je remercie Monsieur B. NICOLARDOT qui a pris une part déterminante dans la réalisation, à la station INRA de Dijon, des mesures de biomasse microbienne.

Enfin, que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail, trouvent ici l'expression de mon amitié.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

I P A R T I E

INTRODUCTION ET GENERALITES

CHAPITRE I - GENERALITES

CHAPITRE II - CYCLES BIOGEOCHIMIQUES

II.1. Généralités

II.2. Cycles du carbone et de l'azote

II.2.1. Le cycle du carbone

II.2.2. Le cycle de l'azote

- a) Les Pertes
- b) Les Gains
- c) Cycle organisation - minéralisation

CHAPITRE III - BIOMASSE RACINAIRE

III.1. Evolution

III.2. Rôle de la biomasse racinaire

CHAPITRE IV - LA DEMARCHE ADOPTEE

II P A R T I E

MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE I - PRINCIPE DE L'UTILISATION DU TRACAGE ISOTOPIQUE

I.1. Notion de traçage isotopique

I.1.1. Notion de traceur

I.1.2. Isotope et Dilution isotopique

SOMMAIRE (suite)

I.1.3. Hypothèses de bases

I.1.4. Choix des isotopes

I.2. Application au cas de l'azote

I.3. Application au cas du carbone

CHAPITRE II - LES SOLS UTILISES

II.1. Le sol Brun Acide

II.2. Le sol Brun Calcaire

II.2.1. Les données pédologiques

II.2.2. Les données climatiques de la saison culturale 83-84

CHAPITRE III - METHODES EXPERIMENTALES

III.1. Le fractionnement

III.1.1. Le fractionnement physique

III.1.2. Le fractionnement chimique

III.2. Méthodes de culture et d'incubation

III.2.1. Les cultures

- a) Les plantes utilisées
- b) Conduite des cultures au champ
- c) Conduite des cultures en serre

III.2.2. Les incubations

CHAPITRE IV - TECHNIQUES ANALYTIQUES ET EXPRESSIONS DES RESULTATS

IV.1. Techniques de dosage appliquées à l'azote

IV.1.1. Dosage chimique de l'azote

- a) Azote total
- b) Azote minéral

IV.1.2. Dosage isotopique de l'azote

IV.1.3. Expression des résultats

SOMMAIRE (suite)

IV.2. Techniques appliquées au carbone

- IV.2.1. Dosage chimique du carbone
- IV.2.2. Dosage isotopique du carbone
- IV.2.3. Expression des résultats

III PARTIE

EXPERIENCES AU CHAMP

BILAN ET CINETIQUE DE L'ORGANISATION ET DE LA MINERALISATION DE L'AZOTE

INTRODUCTION

CHAPITRE I - REPARTITION DE L'AZOTE DE L'ENGRAIS ET DU SOL AU COURS D'UN CYCLE ANNUEL

- I.1. Etat initial du sol**
- I.2. Etat du système sol-plante en fin de culture**
 - I.2.1. Pertes d'azote minéral par lixiviation
 - I.2.2. Répartition de l'azote de l'engrais à la récolte
 - a) Dans le sol
 - b) Azote organisé dans la plante
 - c) Bilan récapitulatif dans le système sol-plante
- I.3. Etat du système sol à la sortie de l'hiver**
 - I.3.1. Azote soustrait par lixiviation
 - I.3.2. Azote présent dans le sol
- I.4. Conclusion**

CHAPITRE II - CINETIQUE DE L'ORGANISATION ET DE LA MINERALISATION DURANT UN CYCLE ANNUEL

- II.1. Au cours de la culture**
 - II.1.1. Evolution de l'azote minéral du sol

SOMMAIRE (suite)

II.1.2. Cinétique d'exportation, d'organisation et de lixiviation

- a) Exportation
- b) Organisation
- c) Lixiviation

II.1.3. Bilan du devenir de l'azote durant la culture

II.2. Au cours de l'hiver suivant la récolte

II.2.1. Evolution de l'azote minéral de la couche 0-60 cm

II.2.2. Evolution de l'azote des percolats

CONCLUSIONS

IV PARTIE

EXPERIENCES DE LABORATOIRE

DEVENIR DU CARBONE ET DE L'AZOTE RACINAIRE

INTRODUCTION

CHAPITRE I - ORIGINE ET CARACTERISTIQUES DES SOLS UTILISES

I.1. Bilan en fin de culture (effectuée en conditions contrôlées)

I.2. Répartition de l'azote et du carbone dans le sol, à la suite de la période de conservation

I.2.1. Le sol de la colonne 5

I.2.2. Le sol de la colonne 4

CHAPITRE II - ETUDE EXPERIMENTALE DE LA MINERALISATION DES COMPOSES CARBONES ET AZOTES

II.1. Evolution du matériel de la colonne 5

II.1.1. Avec et sans culture

- a) CO₂ dégagé
- b) ¹⁴C-CO₂ dégagé

SOMMAIRE (suite)

- II.1.2. Estimation de la biomasse microbienne
- II.1.3. Minéralisation de l'azote au cours de l'incubation
- II.2. Evolution du matériel de la colonne N° 4
 - II.2.1. Le système sol-racines
 - a) CO₂ dégagé au cours de l'incubation
 - b) Minéralisation de l'azote au cours de l'incubation
 - II.2.2. Le sol tamisé à 2 mm
 - a) CO₂ dégagé au cours de l'incubation
 - b) Minéralisation de l'azote au cours de l'incubation
 - II.2.3. La fraction de sol inférieure à 200 µm
 - a) CO₂ dégagé au cours de l'incubation
 - b) Minéralisation de l'azote au cours de l'incubation
- II.3. Conclusions.

CHAPITRE III - «ARRIERE EFFET» DE LA LITIERE RACINAIRE DE MAIS

- III.1. Etude de l'arrière effet sur une culture de maïs
 - III.1.1. Culture de maïs en pots
 - a) Bilan de la culture
 - b) Répartition des traceurs dans la plante
 - c) Fractionnement granulométrique
 - III.1.2. Culture de maïs en colonne de verre
 - a) Résultats
 - b) Conclusions
- III.2. Etude de l'arrière effet sur une culture de Ray-Grass
 - III.2.1. Résultats
 - a) Les coupes intermédiaires
 - b) Bilan de la culture

SOMMAIRE (suite)

III.3. Discussion : la litière racinaire est-elle une source d'azote pour la plante ?

III.3.1. Origine de l'azote exporté au niveau des parties aériennes

III.3.2. Origine de l'azote des nouvelles racines

V P A R T I E

CONCLUSIONS GENERALES

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

R E S U M E

**Evolution d'une biomasse racinaire doublement marquée (^{14}C , ^{15}N) dans
un système sol - plante :**

Etude sur un cycle annuel d'une culture de maïs

Les aspects les plus fondamentaux du devenir des résidus racinaires d'un maïs doublement marqué (^{14}C , ^{15}N) au sein des matières organiques d'un système sol - plante sont abordés en couplant des dispositifs pratiques et les techniques isotopiques du carbone 14 et de l'azote 15. Ces méthodes, associées à deux modes de calcul, permettent de chiffrer les transferts bruts d'azote entre les différents compartiments du système sol - plante.

Au cours d'une culture de maïs, effectuée sur un sol brun calcaire alluvial, 55 % de l'azote du fertilisant est exporté au niveau des parties aériennes. La part du fertilisant organisée par la voie racinaire est proche de celle organisée par la voie microbienne (15 %). Seule une partie du reliquat azoté est entraînée par les eaux de drainage hors du profil, le fertilisant ne subit aucune perte par cette voie, ni par volatilisation, ni par dénitrification. Les pertes d'azote minéral, après la récolte, résultent des cycles organisation - minéralisation du fertilisant.

En effet, 64 % de l'azote organisé par la voie racinaire est drainé, après minéralisation, hors du profil. La biomasse racinaire entraîne une augmentation du niveau de la biomasse microbienne en favorisant le développement de microorganismes à ses dépens et en stimulant la biomasse microbienne du sol.

Ces expérimentations font apparaître un fait nouveau : sous culture, l'azote des résidus racinaires est préférentiellement recyclé au niveau des nouvelles racines. Son transfert ultérieur vers les parties aériennes est négligeable. Deux hypothèses sont susceptibles d'expliquer ce phénomène.

- 1) la présence dans les racines d'endomycorrhizes ayant consommé, dans un premier temps les débris racinaires
- 2) l'absorption, par les racines, de petites molécules organiques stockées dans leurs structures.

Mots-clés :

Biomasse racinaire, azote 15, carbone 14, système sol - plante, minéralisation - organisation, lixiviation - arrière-effet.

**Evolution of root biomass doubly labelled (^{14}C , ^{15}N)
in a plant - soil system :
Study on an annual cycle of maize
cultivation**

The aspects of the evolution of ^{14}C and ^{15}N labelled root residues of maize, in the soil-plant system, are studied by means of field and laboratory experiments and isotopic technics. These methods permit the quantification of the nitrogen fluxes between the different compartments of the plant - soil system.

During the cultivation periode of maize, on a brown calcareous aluvial soil, 55 % of the nitrogen of the fertilizer is exported to the above ground part of the plant. The proportion of the nitrogen of added present in the roots is quite similar to the part immobilized by microbial activity (15 %). Only a part of the remaining nitrogen is eliminated out of the profile with draining water, therefore the fertilizer is lost neither by this way nor by volatilization or denitrification.

Any loss of nitrogen after cropping comes from the mineralization - organization of added nitrogen : 64 % of the nitrogen immobilized in the roots is drained after mineralization. The root biomass induces an increase of the microorganism populations.

These experiments showed a very interesting result : in a soil under a culture, the nitrogen from residual roots is preferentially used by the young roots and its translocation to the green parts is negligible. Two hypotheses are pointed out in order to explain this result :

- 1) the presence in the roots of the new maize of microorganisms (endomycorrhizes) which first consume the root debris
- 2) the absorption by the roots of small organics compounds, which are stored in their structures.

Key words :

Roots biomass, nitrogen 15, carbon 14, plant - soil system, mineralization - organization, lixiviation, residual effect.

**Transformacion de biomasa radical doblemente marcada (^{14}C , ^{15}N)
en un sistema suelo - planta :**

Estudio en un ciclo anual de un cultivo de maiz

Los aspectos mas fundamentales de las transformaciones de residuos radiculares de maiz doblemente marcado (^{14}C , ^{15}N) en un sistema suelo - planta son abordados mediante los dispositivos practicos y las técnicas isotopicas del carbono - 14 y el nitrogeno - 15. Los metodos asociados a esas dos tecnicas permiten medir las transferencias brutes, del nitrogen entre los diferentes compartimientos del sistema suelo - planta.

En el transcurso de una cosecha de maiz efectuada sobre an suelo marron calcareo aluvial, 55 % del nitrogeno del fertilizante es exportado a las partes aereas. El porcentaje del fertilizante que es immobilizado via raices es cercane a la cantidad immobilizada por la via micro-biene (15 %). Solo una parte del nitrogeno es arrastrada fuera del perfil por las aguas de drenaje, el percolozante no sufre ninguna perdida por esta via ni por volatilizacion ni desnitrificacion.

Asi, las perdidas de nitrogeno mineral, despues de la cosecha, resultan de ciclos de organizacion - mineralizacion del fertilizante : 64 % del nitrogeno organizado (immobilizado) par via radical es drenado despues de la mineralizacion fuera del perfil. La biomasa radical ucarrea un aumento del nivel de biomasa microbiena favoreciendo el desarrollo de micro-organismos a sus expensas y estimulendo, por tento, la biomasa microbiene.

Estes experimentos demuestran que bajo cultivo el nitrogeno de los residuos radicales es preferblemente reciclado a nivel de las raices jovenes, y su posterior transferencia hacia las partes aereas es despreciable. Dos hipotesis son capaces de explicar este fenomeno :

- 1) la presencia en las raices de endo - micorrizas que consumen al comienzo los residuos radicales
- 2) la absorción, por las de pequenas moléculas orgánicas que conserven en su estructura.

Palabres claves :

Biomasa radical, nitrogeno 15, carbono 14, sistema suelo - planta, mineralizacion organizacion, lixiviacion, efecto residual.

I PARTIE
INTRODUCTION ET GENERALITES

INTRODUCTION

I GENERALITES

Ce n'est qu'à partir de 1680, à la suite de nombreuses observations empiriques, que se pose le problème de la nutrition végétale dans le sol. L'introduction des méthodes de la physique et de la chimie, illustrée notamment par les travaux de LIEBIG (1840) et DUMAS (1861), a permis de ne plus considérer le sol comme un milieu stable et inerte. Mais, il faut attendre les travaux de DOKOUCHEV (1883) pour que ces notions prennent toutes leurs significations. En effet, le sol, développé au contact de la Biosphère, de la Lithosphère et de l'Hydrosphère*, est alors défini comme une succession d'HORIZONS inter-dépendants et possédant des caractéristiques propres. En s'appuyant sur ces notions, un certain nombre de classifications, russes ou américaines, ont été élaborées. Parmi l'école française, on peut citer les travaux de DEMOLON (1931) et ceux de AUBERT (1968) qui établissent une classification morphogénétique. Certains chercheurs, et notamment DUCHAUFOR (1976), ont attribué à la matière organique une plus grande place dans les critères de choix. En effet, la matière organique, abondante dans les horizons de surface, ainsi que ses transformations, caractérise le sol en tant que milieu de culture et en tant qu'objet d'étude de l'agronomie.

Ces essais agronomiques ont étudié, dans un premier temps, les réponses d'une culture à un type de fumure, et plus particulièrement aux engrais azotés.

Mais, l'augmentation du coût des engrais a conduit, à une augmentation relative de la part consacrée à la fertilisation dans le coût de production, et a poussé les agronomes à tenter de mieux comprendre les transformations de l'azote apporté et à ne plus considérer le sol comme un simple support. Cette prise de conscience a été renforcée par le constat d'appauvrissement du stock de matière organique du sol par suite de l'intensification et de la spécialisation des cultures.

Ceci a suscité une meilleure coordination des recherches concernant à la fois les transformations de l'engrais apporté et la contribution du sol à l'élaboration d'un végétal. L'introduction et le développement des techniques isotopiques dans ce domaine a permis de substituer, à la notion de coefficient apparent d'utilisation, celle de coefficient réel d'utilisation, et de développer l'usage du concept de système. Ainsi, on peut définir différents systèmes :

* **Eco-système** : il prend en compte l'étude complète du sol, en équilibre avec la végétation, le climat et la roche-mère.

* **Le système Sol - Plante** : il s'intéresse plus particulièrement aux interactions entre le sol et la plante.

* **Le système Sol - Solution** : il concerne exclusivement les transformations des phases liquides et solides.

Le système peut être divisé, aux fins d'études, en un certain nombre de compartiments plus ou moins arbitraires. Le compartiment suppose qu'il s'agit d'un ensemble fini dont certains constituants au moins ont, pour le temps considéré, des caractéristiques homogènes. A cet égard, ce concept se distingue de celui de Pool, qui correspond à un ensemble fini dont les éléments concourent tous à la même fonction.

En ce qui concerne la matière organique des systèmes sol-plante, on peut définir au moins trois compartiments clés : un compartiment d'entrée (racines et débris), un compartiment de réaction (biomasse microbienne et plante) et un compartiment de stockage (substances humiques). Cependant, dans la pratique, on est amené à confronter cette notion conceptuelle de compartiments à celle plus réelle de fractions, celle-ci pouvant être séparées par des techniques physiques ou chimiques telles que la granulométrie, l'hydrolyse ou l'extraction par des solvants.

Ces quelques notions étant définies, nous allons nous intéresser aux moyens mis à notre disposition pour étudier le système sol-plante. Une telle étude passe par la connaissance des transferts existant entre les différents compartiments. Ces transferts relèvent des cycles biogéochimiques.

II CYCLES BIOGEOCHIMIQUES

II.1. Généralités

Définition

Pour reprendre la terminologie de DUVIGNEAUD (1974), un cycle biogéochimique peut en fait se diviser en deux parties distinctes :

- * un cycle biologique qui correspond aux transferts internes de l'élément considéré entre les différentes fractions du système,

- * un cycle géochimique qui est en réalité un cycle ouvert, provenant de l'extérieur mais branché sur le précédent.

Chaque cycle biogéochimique possède des caractéristiques spécifiques dérivant des propriétés physico-chimiques de l'élément considéré. On aborde donc le devenir de tel élément par rapport à une phase représentative. Ainsi, dans le cas de la silice, son cycle est caractérisé par l'abondance des formes amorphes. En ce qui concerne le fer et l'aluminium les formes les plus caractéristiques sont les formes cristallines. Le cycle du carbone et de l'azote, éléments qui entrent de façon prépondérante dans la constitution des organismes (plantes et microflore), requièrent donc le suivi des formes minérales et organiques de ces éléments.

II.2. Cycles du carbone et de l'azote

II.2.1. Le cycle du carbone

D'un point de vue purement quantitatif, le cycle du carbone est le plus important des cycles biogéochimiques du système sol-plante, et ses mécanismes sont d'une grande diversité.

Ce cycle se confond en partie avec le flux d'énergie. Bien que les sources de C soient très nombreuses, ce n'est que sous la forme CO_2 gazeux qu'il est utilisé, lors de la photosynthèse, dans l'élaboration de la matière organique. Ce CO_2 représente le compartiment d'entrée, alors que la matière organique constitue celui de stockage. Le compartiment de réaction est symbolisé par la plante et les microorganismes.

De nombreux auteurs ont étudié soit à l'aide de CO_2 enrichi en ^{14}C , le flux de matière et d'énergie dans le système sol-plante en milieu terrestre (WAREMBOURG 1977), ou en milieu aquatique (LIBES 1984) soit à l'aide de ^{14}C naturel les transformations de la matière organique des sols (GUILLET 1972, RAPAIRE et TURENNE 1977, GOH et PULAR 1977, HERRERA et TAMERS 1978, BALESSENT 1981, CHERKINSKI 1981).

II.2.2. Le cycle de l'azote

L'air atmosphérique contient 80 % d'azote, et représente le réservoir azoté du système sol-plante, dont l'alimentation se fait par le biais de deux mécanismes :

- * les pluies qui entraînent avec elles des formes oxydées de l'azote.

- * par l'activité des microorganismes capables d'utiliser une partie de l'énergie respiratoire pour fixer de l'azote atmosphérique.

Dans les deux cas, il s'agit d'azote sous forme minérale, qui représente presque exclusivement le compartiment d'entrée.

De nombreux auteurs ont donné une représentation schématique du cycle biogéochimique de l'azote (DOMMERGUES et MANGENOT 1970, ELLENBERG 1971, HENIN 1981). En ce qui nous concerne, nous n'entrerons pas dans l'étude détaillée de chacune des réactions de ce cycle, mais nous nous intéresserons plus particulièrement aux transformations subies par l'azote minéral apporté au système sol-plante, en considérant d'une part les pertes et d'autre part les gains. Une telle approche reflète le souci des agronomes qui est de maintenir un équilibre entre pertes et gains.

a) Les Pertes

Les pertes en azote se font presque exclusivement sous la forme minérale et sont de trois ordres :

- * dénitrification

- * volatilisation

- * lessivage et/ou lixiviation

De nombreux travaux, portant sur la Dénitrification (DELWICHE et BRYAN 1976, GUIRAUD et BERLIER 1969, GERMON 1980, ZABLATOWICZ et FOCHT 1979), et sur la Volatilisation (FAURIE 1980, GANRY et GUIRAUD 1979, CARRIER et BERNIER 1971), ont déterminé les conditions particulières de pH et de Eh dans lesquelles se déroulent ces réactions, et ont de plus quantifié leur importance. Dans les essais agronomiques qui utilisent les engrais marqués à l'azote 15 (NOMMIK 1973, KOWALENKO 1978, CARTER et al 1967) ces deux composantes ne sont déterminées que par différences entre les quantités de ^{15}N introduites et celles retrouvées dans la plante et le sol. Pour notre part, nous n'aborderons l'étude de ces facteurs que par cette méthode.

Par ailleurs, la difficulté d'estimer le lessivage, qui intéresse essentiellement les formes nitriques de l'azote, est liée à la grande hétérogénéité des prélèvements de sol (LINDEMANN et GUIRAUD 1978) Seule la mise en place de cases lysimétriques permet, et ce malgré certaines imperfections, de déterminer l'azote de l'engrais perdu par lixiviation (BONIFACE 1981). Nous avons utilisé, dans nos essais au champ, un tel dispositif.

b) Les Gains

Une partie de l'azote apporté, sous forme minérale, au système sol-plante peut soit être exportée au niveau des parties aériennes, soit être organisée au niveau du sol.

- Exportation

A l'exception de quelques plantes acidophiles, l'utilisation de l'azote se fait en grande partie sous forme d'ion nitrique. Cependant, l'énergie dépensée pour la réduction et l'assimilation de cet ion est plus importante que celle nécessaire à l'assimilation de l'ion ammonium. Un tel paradoxe s'explique par le fait que le déséquilibre électrique engendré par l'absorption de l'ion NH_4^+ nécessite la synthèse d'acides organiques, consommant plus d'énergie que la simple assimilation de l'ion NO_3^- .

Dans chacun des cas, une telle assimilation conduit à la formation de composés organiques qui entrent dans la formation des tissus constituant la biomasse végétale. Une fraction de cette biomasse azotée est totalement exportée (grains, épis de blé ...) et se trouve ainsi soustraite au cycle biogéochimique de l'azote.

- Organisation dans le sol

A côté de l'azote exporté par les parties aériennes, une partie de l'apport minéral est utilisé pour la synthèse des composés organiques qui constituent les tissus végétaux et/ou microbiens. Dans le sol, cette organisation peut suivre deux voies :

* une organisation microbienne qui conduit à la formation d'une biomasse microbienne.

* une organisation que nous avons qualifiée de racinaire qui aboutit à la formation d'une biomasse racinaire. Nous avons voulu, avec cette terminologie, distinguer l'azote exporté au niveau des parties aériennes du végétal de celui encore présent dans le sol sous forme organique. L'organisation de l'azote s'oppose ainsi aux pertes, ou les retarde pour beaucoup plus longtemps.

Cependant, tout ou partie de l'azote ainsi organisé dans les différentes biomasses peut se retrouver sous forme minérale au cours d'une réaction biologique dite de **Minéralisation**.

c) Cycle Organisation - Minéralisation

Il s'agit en effet, d'un véritable cycle interne au système sol. Il représente ce que nous avons défini comme étant la partie biologique du cycle biogéochimique de l'azote. Les apports, les pertes peuvent être considérés comme étant la partie géochimique auxquelles on peut ajouter les exportations dans le cas des systèmes Sol-Plante, viennent se greffer sur ce cycle biologique.

La minéralisation se déroule en plusieurs étapes au cours desquelles interviennent des organismes spécifiques pour aboutir, en tout dernier lieu, sous l'action de la microflore (bactérienne et fongique), à la libération d'azote minéral. Les étapes intermédiaires donnent naissance à des composés possédant des degrés d'altération croissants : ils forment ce que KESTEMONT (in DUVIGNEAUD 1974) a nommé la **Nécromasse** qui représente l'essentiel du compartiment de stockage (95 %).

Il apparaît donc que la biomasse ait un rôle tout à fait particulier, puisqu'elle est à la fois un puits, une source et un compartiment de réaction du système sol-plante.

L'azote minéral est alors considéré comme le point de convergence et le point de départ de ce cycle. Cependant, son importance quantitative ne traduit, à un instant donné, que les flux nets existants entre les formes organiques et minérales de l'azote.

L'utilisation des marquages artificiels, telle qu'elle a été faite dans cette étude, va nous permettre de mieux quantifier l'ampleur des phénomènes BRUTS, à savoir : **L'ORGANISATION BRUTE ET LA MINERALISATION BRUTE**.

III BIOMASSE RACINAIRE

III.1. Evaluation

Nous venons de voir que l'azote minéral apporté, s'il n'est pas perdu pour le système sol-plante, est utilisé comme substrat pour la synthèse de composés organiques. Il se forme alors différentes biomasses végétales, microbiennes ou racinaires.

S'il paraît facile de quantifier pondéralement la biomasse végétale (12 tonnes matière sèche/ha/an pour une forêt (DUVIGNEAUD 1974), l'estimation de la biomasse microbienne et racinaire pose un certain nombre de problèmes liés à la difficulté de leur isolement. Dans bien des cas, ces biomasses ne sont quantifiées qu'au travers d'un de leur élément constitutif. Par exemple, la biomasse microbienne est évaluée à 108 kg N/ha, à 83 kg P/ha et à 70 kg K/ha (ANDERSON et DOMSCH 1980). Il faut noter que ces résultats sont en bonne correspondance avec ceux de CLARK et PAUL (1970), qui ont estimé que la biomasse microbienne des 10 premiers centimètres de sol était égale approximativement à 70 g/m².

De plus, les racines en cours de croissance ne se contentent pas simplement d'absorber des ions minéraux, mais elles sont le siège d'une exsudation d'azote dont l'intensité dépend à la fois de leur concentration azotée et de celle de la solution (BASSIONI et IKONOMOVA 1971). De ce fait, la mesure pondérale de la biomasse racinaire, à un instant donné, peut être multipliée par trois.

Malgré ces difficultés, de nombreux auteurs ont tenté, à l'aide soit de modèles mathématiques (LUNGLEY 1973), soit en observant minutieusement les racines (DICKINSON 1982) de quantifier la biomasse racinaire.

III.2. Rôle de la biomasse racinaire

Les molécules carbonées photosynthétisées au niveau des parties aériennes, peuvent être ensuite transportées, sous forme organique, vers les racines.

On admet, en général, que 80 % des radiations solaires sont absorbées par la culture mais que seul 1 % de cette énergie est utilisé au cours de la photosynthèse (COSTES 1975). De plus, on estime qu' environ 10 à 20 % de ces photosynthétats sont exsudés vers les racines (BARBER et MARTIN 1976, GUCKERT et BALENDREAU 1981, ROVIRA et al 1983). La nature de ces exsudats racinaires est fonction non seulement du stade de développement de la plante (VANCURA et HANZLIKOVA 1972), mais aussi de son état physiologique (CLAUDIUS et MEHROTRA 1973). Il s'agit à 90 % de polysaccharides, le reste étant constitué de protéines.

La sécrétion de ces molécules engendre, au voisinage immédiat des racines, défini par HILTNER (1904) sous le terme de **Rhizosphère**, la prolifération d'une microflore associée à ces exsudats. La dynamique de cette biomasse rhizosphérique suit de près celle de l'exsudation, il existe, de plus, une interaction entre cette biomasse et l'intensité de l'exsudation (BARBER et LYNCH 1977). Dans le cas d'une prairie, il apparaît que seule 4 à 10 % de la surface racinaire est colonisée par des bactéries (ROVIRA et al 1974), dont un certain nombre semble résister au lavage à l'eau (DAZZO 1984). Cependant, dans le cas du maïs la prolifération des bactéries au voisinage des racines peut être freinée en présence endomycorhizes (LAHEURTE 1985).

Ainsi, malgré les difficultés d'estimer pondéralement la biomasse racinaire, de nombreux auteurs se sont intéressés aux phénomènes d'absorption, d'exsudation, de croissance de ces racines.

On peut se demander la part que prennent ces phénomènes d'organisation racinaire par rapport à l'organisation microbienne. Puis, quelle sera l'évolution de l'azote racinaire après la récolte des parties aériennes, ainsi que sa part dans l'élaboration d'un nouveau matériel végétal, en d'autre terme, quel sera l'arrière effet d'une telle litière racinaire.

IV LA DEMARCHE ADOPTEE

Si un écosystème naturel est soumis à de nouvelles contraintes extérieures, les modifications encourues peuvent parfois être irréversibles. JORDAN et al (1983) ont montré qu'après la transformation de la forêt équatoriale primaire en une zone agricole, l'ensemble de l'écosystème perdait 7 % de son azote par an, sans que pour cela le sol ne voit, à condition d'enfouir les résidus, son stock d'azote diminuer durant les trois premières années. Cependant, la poursuite et l'intensification des cultures va provoquer son appauvrissement. En zone agricole, les agronomes et notamment DROVEN et al (1980), ont mis en évidence l'existence de cette baisse. Pour pallier ce déficit, les chercheurs ont préconisé un réenfouissement des résidus de culture. Certains auteurs constatent les effets bénéfiques d'un tel apport (HALSTEAD et SOWDEN 1968), alors que d'autres constatent, malgré cet apport, une diminution de la teneur en matière organique (BROADBENT et NORMAN 1946, HALLAM et BARTHOLOMEW 1953).

En relation avec ces problèmes, d'autres chercheurs ont tenté, à l'aide de ^{15}N , de différencier, dans l'engrais apporté, la fraction réellement utilisée par la plante (LINDEMANN et al 1983, VAN CLEEMPUT et BAERT 1984, MASAYANA et al 1985, MONEM et al 1972, PAPANICOLAOU et al 1985), de celle organisée dans le sol (LADD et al 1977, OLIVER et al 1978) et dans les racines (POWER et LEGG 1984). Bien que ces racines puissent être considérées comme des «résidus obligatoires», peu d'études portent :

1. sur la quantification, au champ, de la biomasse racinaire.
2. sur l'évolution dans le sol, après la récolte des parties aériennes, d'une telle biomasse et notamment sur sa contribution à l'azote perdu par lixiviation.
3. sur la vitesse de minéralisation de cette biomasse racinaire.
4. sur l'effet d'une telle litière racinaire sur la biomasse microbienne.
5. sur la contribution, de cette litière racinaire, à l'élaboration d'un nouveau matériel végétal.

Dans notre étude, à l'aide des techniques isotopiques de l'azote 15 et du carbone 14 , et en confrontant les résultats issus d'une part d'expériences au champ (case lysimétrique, parcelle de plein champ) et d'autre part ceux obtenus au cours d'expériences de laboratoire (incubation, cultures), nous avons pu :

* quantifier l'utilisation réelle, par une culture de maïs, de l'azote de l'engrais apporté ainsi que la contribution de l'azote du sol.

* estimer la part respective de l'azote organisé par les voies racinaire et microbienne.

* suivre l'évolution de ces deux formes d'azote organique, par le biais des percolats, après la récolte des parties aériennes.

* tenter d'estimer l'influence de ces racines sur le niveau de biomasse microbienne.

* quantifier la part de l'azote d'une telle litière racinaire à l'élaboration d'un nouveau végétal.

En conclusion, nous pourrions représenter schématiquement ces diverses transformations de l'azote apporté et aussi évaluer ce que nous définissons comme l'arrière effet de la litière racinaire.

II PARTIE
MATERIEL ET METHODES

Dans les quatre chapitres, qui suivent, nous nous limiterons à exposer brièvement le principe des méthodes choisies, le détail des protocoles étant donné dans les annexes.

CHAPITRE I - PRINCIPE DE L'UTILISATION DU TRAÇAGE ISOTOPIQUE

I.1. Notion de traçage isotopique

La technique de marquage isotopique a permis d'acquérir des informations nouvelles sur les systèmes sol-plante. La spécificité des informations obtenues tient, tout d'abord, à la connaissance de l'origine des constituants analysés, à condition que le compartiment d'introduction du traceur soit unique et bien défini.

D'autre part, la pratique des traçages isotopiques conduit à la connaissance des cinétiques d'échange entre les compartiments considérés, dont on connaît déjà la nature et le volume. Ces échanges consistent en des flux de matières passant d'un compartiment à l'autre. Pour les apprécier, il est nécessaire de multiplier dans le temps les points d'observations et de mesures. C'est ce que nous ferons, en répétant des expériences successives sur le même sol.

Si on n'utilisait pas de traceurs de telles mesures n'aboutiraient qu'à faire le bilan net des échanges. Ceux-ci étant le plus souvent réversibles, il est nécessaire d'utiliser des traceurs permettant d'accéder à la quantification des phénomènes bruts.

I.1.1. Notion de traceur

D'une façon très générale, on appelle traceur d'un élément dans un système complexe, un composé, facilement détectable, que l'on peut introduire dans le système sans perturber ce dernier. Le suivi dans le temps de ce composé permet d'évaluer qualitativement et quantitativement l'évolution de l'élément dont il est représentatif.

Par exemple : dans les grottes d'un système karstique, on introduit de la fluoresceïne pour tracer le comportement de l'eau dans le système. Au bout d'un temps donné après l'introduction du traceur au point A, on connaît la localisation des points de sortie B et C. De plus, si l'on a pris soin de mesurer la concentration initiale du traceur dans le compartiment d'introduction, la mesure de la concentration finale permet de donner, par simple dilution, le volume total de l'eau dans le système.

Dans un système biologique plus complexe, tel qu'une micro-région avec ses populations d'insectes, on peut chercher à connaître l'effectif d'une espèce et ses déplacements dans le système. Pour ce faire, on prélève, par exemple, au point A, 1000 individus dont 100 sont marqués par un signe distinctif facilement repérable tel qu'une tâche de peinture ou une petite dose de radioactivité ; des captures successives dans plusieurs points du système, permettent de connaître ses déplacements à partir du point A et l'effectif total de la population.

Cette méthode de détermination ne nécessite pas que soit prélevé la totalité des individus marqués. Seul un échantillon représentatif suffit pour quantifier l'ensemble de la population.

I.1.2. Isotope et Dilution isotopique

Les isotopes sont définis comme des formes légèrement différentes du même élément chimique. Ils possèdent donc le même numéro atomique, donc les mêmes caractéristiques et propriétés chimiques, mais ont une masse atomique différente, différence qui dans certains cas s'accompagne d'émission de particules. (L'isotope est alors dit radioactif.)

Ces différences peuvent être mises à profit pour utiliser un isotope, radioactif ou stable, comme traceur de l'élément dans un système chimique ou biologique.

L'introduction du traceur ne sert pas seulement à observer les déplacements de l'élément dans le système, mais surtout à quantifier des flux entre les compartiments, par des mesures successives de la dilution du traceur. C'est pourquoi nous serons souvent amenés à parler de dilution isotopique, qui sera la méthode fondamentale employée dans le présent travail.

L'utilisation de cette méthode repose, tout d'abord, sur la connaissance du rapport initial S_1 , entre la quantité de traceur et la quantité de l'élément à tracer du compartiment d'introduction (volume du compartiment Q_1). Dans le cas d'un isotope radioactif, ce rapport sera appelé **RADIOACTIVITE SPECIFIQUE (R.A.S.)** : rapport d'une quantité de radioactivité et d'une masse de l'élément présent dans le compartiment. Dans le cas d'un isotope stable, il s'agit de l'**ABONDANCE ISOTOPIQUE** ou **TENEUR ISOTOPIQUE**, qui est égale au rapport de la quantité de l'isotope utilisé sur la quantité totale de l'élément considéré. De plus, on définit la notion d'**EXCES ISOTOPIQUE (E %)** comme étant égale à la différence entre la teneur isotopique de l'échantillon étudié et celle d'un étalon. Au cours ou au terme de la réaction étudiée, on mesure le **rapport homologue S_2** , ce qui nous permet de connaître la quantité Q_2 , de l'élément présent dans le compartiment inconnu selon la formule :

$$Q_2 = ((S_1 - S_2) / S_2) * Q_1$$

Deux types d'informations peuvent être obtenues par dilution isotopique, selon que l'on s'intéresse à l'état final, une fois réalisé l'équilibre isotopique, du système ou aux cinétiques permettant d'arriver à cet équilibre.

Signalons que dans le cas de l'azote et du carbone des systèmes sol-plante, les cinétiques suivies correspondent plutôt à des phénomènes d'ordre biologique, alors que dans le cas d'autres éléments, par exemple le phosphore, les phénomènes d'ordre physico-chimique jouent un rôle plus important (FARDEAU 1981).

I.1.3. Hypothèses de bases

Trois hypothèses fondamentales sont essentielles pour l'utilisation des isotopes stables dans les systèmes sol-plante :

- * 1. les éléments ont à l'état naturel une composition isotopique constante.
- * 2. les organismes vivants ne peuvent que très difficilement distinguer les isotopes d'un même élément.
- * 3. les propriétés isotopiques sont conservées au cours des transformations biologiques.

Des études, commencées dès 1971 par RIGA et al et celles menées plus récemment par MARIOTTI (1982), basées sur la variation des abondances naturelles, montrent que les hypothèses 1 et 2 ne sont pas rigoureusement exactes. Cependant, dans notre travail, les quantités de traceur introduites rendent insignifiantes les variations de teneur naturelle: il nous est donc possible de considérer ces hypothèses comme acceptables.

I.1.4. Choix des isotopes

Après avoir établi la nécessité, pour la résolution du problème posé, d'utiliser les traceurs isotopiques, il faut choisir ces derniers en fonction d'un certain nombre de critères scientifiques et de contraintes pratiques :

- * dans le cas des radioisotopes, une période compatible avec la durée de l'expérience.
- * dans le cas des isotopes stables, une quantité de traceur introduite, compatible avec une détection facile dans tous les compartiments étudiés.
- * dans le cas de marquage multiple, une compatibilité de détection doit être garantie.

Le plus souvent, l'introduction en une seule fois du traceur dans un compartiment unique est la condition d'une interprétation simple et sans équivoque des expériences effectuées.

I.2. Application au cas de l'azote

Les chercheurs ont préféré, en raison des demi-vies trop brèves des radioisotopes de l'azote (12, 13, 16, 17), utiliser l'isotope stable ^{15}N . Signalons toutefois, que l'isotope 13 de l'azote, qui possède la demi-vie la plus longue (10 mn), a été employé dans des études portant sur des transformations rapides de l'azote, telle que la dénitrification (GERSBERG 1977, CAMPBELL et al 1967).

En pratique, dans les expériences portant sur l'étude des systèmes sol-plante, les deux cas de figures les plus fréquents sont les suivants :

* si l'expérimentateur s'intéresse à la nutrition azotée de la plante, au champ ou en serre, un enrichissement de départ de l'ordre de 1 % lui sera suffisant.

* par contre, s'il s'intéresse au devenir de l'azote dans le sol sous culture, la dilution isotopique dans l'azote préexistant du sol lui imposera l'utilisation d'un enrichissement au moins 20 à 30 fois plus élevé.

I.3. Application au cas du carbone

Le carbone est, avant l'hydrogène et l'oxygène, le constituant essentiel de la matière et représente, de plus, le véhicule de l'énergie à tous les niveaux trophiques d'un écosystème. De ce fait, il peut être considéré comme le traceur privilégié de la matière organique et de ses transformations.

Parmi les quatre isotopes du carbone (12, 13, 14, 11), les deux premiers sont stables et les deux autres radioactifs. A côté des utilisations, pour les datations et les mesures de temps moyen de résidence en carbone de la matière organique des sols (SCHARPENSEL et PIETIG 1966, LOBO 1972, MARTEL et PAUL 1974, SCHARPENSEL 1976, HETIER et al 1983), le ^{14}C a servi à réaliser de nombreux marquages de plantes par la photosynthèse et de microorganismes.

A partir de tels marquages, on a pu suivre l'incorporation de constituants dans la matière organique préexistante et/ou leur minéralisation ultérieure.

CHAPITRE II - LES SOLS UTILISES

II.1. Le sol Brun Acide

Il s'agit d'un sol Brun Acide sablo-limono-argileux d'une haute terrasse de la Moselle (Archette dans les Vosges : F.A.O. ; Orthic Acrisol (annexe M₁) Ce sol a servi de support à une première culture de maïs doublement marqué en chambre de végétation (HETIER et al (1980) (atmosphère enrichie en $^{14}\text{CO}_2$ et irrigation fertilisant Ca ($^{15}\text{NO}_3$)).

II.2. Le sol Brun Calcaire

Ce sol est localisé sur la station expérimentale de Gréoux-les-Bains (I.T.C.F.). Au cours de la saison culturale 83-84, nous avons conduit sur celui-ci une culture de maïs.

II.2.1. Les données pédologiques

Les caractéristiques pédologiques de ce sol, développées sur les alluvions de la Durance, apparaissent en annexe M₃.

II.2.2. Les données climatiques de la saison culturale 83-84 (annexe M₃ bis)

* Pluviométrie

L'année 83-84 est une année globalement humide (pluviométrie supérieure de 60 mm à la médiane) mais avec des irrégularités (le mois de Mai, ainsi que la première décade d'Octobre, ont été particulièrement pluvieux : 106 mm).

* Température

La température moyenne de Mai à Juin (durant les fortes pluies), ainsi que celle de Septembre et début Octobre, sont inférieures de 4 °C à la médiane.

* Demande climatique

L'évapo-transpiration potentielle (E.T.P.) est inférieure à la normale, surtout de début Mai au 20 Juin et de début Août à fin Septembre.

La saison 83-84 est une année humide et fraîche, marquée par :

1. la succession d'un mois d'Avril sec et Mai-Juin pluvieux qui ont eu pour conséquence des semis de maïs dans des conditions difficiles et un début de développement
2. un mois de Septembre frais, suivi d'un mois d'Octobre doux et pluvieux responsable d'une maturité lente des maïs.

CHAPITRE III - METHODES EXPERIMENTALES

Sur le plan expérimental, le concept de compartiment fait place, comme nous l'avons dit en introduction, à celui de fraction. Une fraction peut être isolée en utilisant diverses techniques :

- * Physiques.
- * Biologiques.
- * Chimiques.

«L'origine végétale de la matière organique du sol a conduit les chercheurs à appliquer au sol les méthodes employées pour l'analyse des végétaux, aussi, la plupart des travaux de solubilisation des composés azotés a été obtenue par hydrolyse acide» (DECAU 1968).

Pour éviter de confondre les produits d'hydrolyse provenant des résidus végétaux, de biomolécules récemment formées (JOCTEUR MONROZIER 1984) et de substances humiques parfois stabilisées depuis des siècles, il nous a semblé plus avantageux d'associer ces techniques en parallèle ou en série : nous avons, soit comparé les fractions obtenues séparément par deux ou plusieurs techniques, soit appliqué ces techniques à la suite l'une de l'autre. D'une façon générale, il est important d'utiliser en premier les réactifs les moins agressifs, sous peine de mélanger artificiellement des constituants qui n'étaient pas liés dans le sol, ou d'extraire des composés néoformés sous l'action de ces réactifs.

III.1. Le fractionnement

Le fractionnement est ici considéré comme un instrument d'observation de l'évolution de la matière organique au cours du temps, avant et après les différentes phases de conservation de culture et d'incubation du sol.

III.1.1. Le fractionnement physique

Comme de nombreux auteurs (FELLER 1979, BRUCKERT et GAIFFE 1983, TURCHENECK et OADES 1979, ANDREUX et al 1980, ANDREUX et CORREA 1981), nous avons utilisé une méthode de fractionnement physique, une granulométrie, avant toute extraction chimique.

Par destruction mécanique des agrégats et par tamisages successifs sous eau, le sol a été divisé en fractions constituées de particules de tailles décroissantes. Le schéma de ce fractionnement et les détails du protocole sont donnés dans l'annexe M₄ :

L'application d'une telle méthode à l'étude d'un système sol-plante nous a permis d'isoler diverses fractions ayant un degré d'humification croissant, depuis les racines vivantes jusqu'aux complexes organo-minéraux.

Le tamisage à 2000 μm permet de séparer la plus grande partie des racines vivantes, que l'on peut considérer à la fois comme un constituant, une fraction et un compartiment du système sol-plante.

La séparation de la fraction comprise entre 2000 μm et 200 μm est l'occasion de parfaire l'isolement de ces racines, dont la densité est généralement supérieure à 1 et le rapport C/N inférieur à 25. Elle permet en outre, d'isoler une nouvelle fraction : les Débris Figurés, végétaux en voie d'humification dont la densité est inférieure à 1 et le C/N supérieur à 30.

La fraction comprise entre 200 μm et 50 μm est essentiellement formée de débris fins.

Celle inférieure à 50 μm est souvent considérée comme ne contenant que des complexes organo-minéraux amorphes. Cependant, des travaux récents (DUQUET 1985, GAIFFE et al 1984) ont montré la présence d'une quantité importante de débris ultrafins dans cette fraction.

La séparation des fractions de la taille des argiles, effectuée par différents auteurs (YOUNG et SPYCHER 1979, TURCHENEK et OADES 1979, ANDREUX et al 1980) se heurte ici à la limitation imposée par la précision des mesures d'excès isotopiques. En effet, nous n'aurions pas pu faire, sur ces fractions, de mesures isotopiques significativement différentes.

III.1.2. Le fractionnement chimique

Dans le sol, l'azote est présent sous deux formes principales :

* l'azote minéral (nitrique et ammoniacal) qui est la forme la plus rapidement utilisée par les plantes. Il est extrait par KCl 1N (voir annexe M₅).

* l'azote organique, la forme la plus abondante, constitue en général au moins 95 % de l'azote total du sol.

Nous avons appliqué, sur la fraction inférieure à 50 μ m après extraction de l'azote minéral, la méthode d'hydrolyse acide proposée par BREMNER (1963) modifiée par STEWART (1963) et décrite à l'annexe M₆.

Selon ces auteurs, l'azote organique ainsi fractionné se répartit comme suit :

* sucres aminés et acides aminés (azote soluble et distillable : N.S.A.D.).

* acides aminés et osamines restantes (azote soluble et non distillable : N.S.A.N.D.).

* hétérocycles et polycondensats néoformés au cours de l'hydrolyse (azote insoluble non identifié : N.I.A.).

III.2. Méthodes de culture et d'incubation

Pourquoi ne pas utiliser les plantes et la biomasse microbienne comme des outils de fractionnement de la matière organique d'un sol.

En effet, l'aspect des plantes et la productivité des cultures donnent un reflet biologique du fonctionnement du sol. De plus, nous savons que la plupart des transformations des constituants organiques du sol résultent de l'activité de la biomasse microbienne:

Il était donc concevable d'utiliser les méthodes de culture de plantes et d'incubation des populations microbiennes en association avec les méthodes de fractionnement des matières organiques.

III.2.1. Les cultures

a) Les plantes utilisées

Le choix du maïs et du Ray-grass correspond plus à des nécessités pratiques que scientifiques. Outre que ces plantes sont très largement utilisées dans l'agriculture de notre pays (maïs 16 % des surfaces cultivées (GAY 1984) il est facile d'isoler les parties aériennes de l'ensemble sol-racines pendant la culture du maïs, et de réaliser des cultures de Ray-grass en vases de végétation, comportant de nombreuses répétitions et plusieurs coupes, sur de faibles quantités de sol.

b) Conduite des cultures au champ (annexe M₇)

Au cours d'une seule saison de végétation, la culture de maïs a été menée, sur des parcelles en présence d'engrais azoté, dont le taux de marquage a été différencié en fonction des objectifs poursuivis, d'une part l'étude des sorties d'azote du système sol-plante (exportation et lixiviation des formes solubles), et d'autre part l'étude de l'évolution des formes organisées.

La quantité d'azote 15 apportée, au moment du semis, a été calculée au plus juste, afin de permettre des mesures isotopiques significatives, dans les percolats d'une part et dans les fractions organiques d'autre part.

c) Conduite des cultures en serre (annexe M₈ et M₈ bis, M₈ ter)

Au terme d'une première culture de maïs (HETIER et al 1980), dont le protocole est donné en annexe M₂, après la récolte des parties aériennes, l'ensemble du système sol-racines a été placé en chambre froide (Les caractéristiques de ce système apparaissent dans le Chapitre I de la IV Partie).

Après cette période de conservation, le sol et les racines ont été soigneusement homogénéisés en vue de leur utilisation pour les cultures et les incubations.

* Culture de maïs sur le sol doublement marqué : une culture de maïs a été menée, jusqu'à maturité (92 jours), sur 20 kg de sol disposé dans un pot fermé (voir annexe M₈).

Pour confirmer certains résultats obtenus, à savoir une accumulation sélective d'azote 15 dans les racines en cours de croissance, il a été réalisé une culture, de 50 jours, sur de petites quantités de la fraction inférieure à 200 µm de ce sol marqué. Les racines ont pu croître à l'abri de toute contamination directe par les débris racinaires enfouis (annexe M₈ bis).

* Culture de Ray-grass : Dans cette expérience, on a voulu vérifier si les résultats énoncés auparavant, étaient reproductibles avec une autre plante. Le Ray-grass se prête bien à un tel test en vase de végétation et permet des temps d'expérimentation beaucoup plus courts (annexe M₈ ter).

III.2.2. Les incubations

Pour pouvoir apprécier l'organisation de l'azote en l'absence de plante, des incubations ont été mises en place. Elles ont été, entre autre, l'occasion de procéder à l'évaluation de la biomasse microbienne.

Nous avons utilisé, pour cela, la méthode biocidale de JENKINSON (1966), modifiée par NICOLARDOT (1983). Cette méthode consiste à mesurer la bouffée ou «flush» de minéralisation se produisant au cours d'une période d'incubation, faisant suite à une fumigation au chloroforme (voir détails du protocole en annexe M₉).

Le couplage de ces techniques à celles du marquage isotopique permet d'évaluer, non seulement, le compartiment «biomasse», mais aussi, la participation des différentes fractions à sa formation.

Nous avons appliqué cette technique à trois traitements : (annexe 9 bis).

- * le sol total contenant des racines.
- * le sol débarrassé de ces racines.
- * la fraction de sol inférieure à 200 μm .

CHAPITRE IV - TECHNIQUES ANALYTIQUES ET EXPRESSIONS DES RESULTATS

IV.1. Techniques de dosage appliquées à l'azote

Le dosage isotopique de l'azote passe généralement par une première étape qui consiste en un dosage chimique.

IV.1.1. Dosage chimique de l'azote (annexe M₁₀)

a) Azote total

Nous avons appliqué la méthode KJELDAHL OLSEN préconisée par GUIRAUD et FARDEAU (1977). Cette méthode permet la réduction des nitrates présents par une attaque ménagée avec du fer en milieu sulfurique concentré. Après refroidissement, on poursuit l'attaque sulfurique durant 3 à 4 h, en présence de catalyseur favorisant la réduction de toutes les formes d'azote en ammonium.

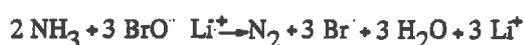
L'ammoniac, entraîné à la vapeur, au cours de la distillation, en milieu basique, est recueilli dans une solution d'acide sulfurique N/10 en excès. La détermination de la quantité d'azote contenue dans l'échantillon (Q_N) se fait par dosage en retour à l'aide d'une solution de soude 0,1 N.

b) Azote minéral

Le dosage chimique des formes ammoniacales et nitriques des extraits fait appel aux techniques décrites par BREMNER (1965).

IV.1.2. Dosage isotopique de l'azote

Le dosage isotopique de l'azote est réalisé après conversion de l'ion ammonium en azote moléculaire. La méthode employée est dérivée de celle de RITTENBERG (1948) et utilise l'action d'une solution d'hypobromite de lithium, dans un dispositif apparenté à celui de ROSS et MARTIN (1970). La réaction est la suivante :



Les mesures d'abondance isotopique sont effectuées sur un spectromètre de masse, V.G. MICROMASS 622 à double collection et simple introduction, permettant la détection des faisceaux d'ions :

$$m/z = 28 \text{ (}^{14}\text{N }^{14}\text{N)}.$$

$$m/z = 29 \text{ (}^{14}\text{N }^{15}\text{N)}.$$

$$m/z = 30 \text{ (}^{15}\text{N }^{15}\text{N)}.$$

L'abondance isotopique, A, est pourcentage d'atomes de ^{15}N par rapport au nombre total d'atomes d'azote :

$$A = \left(\frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N} + ^{15}\text{N}} \right) * 100$$

A pourra donc être calculé à partir des trois pics 28, 29 et 30. Dans le cas des échantillons faiblement enrichis ($\leq 10\%$) le nombre de molécules $^{15}\text{N}_2$ est trop faible pour être mesurable. Pour pallier cet inconvénient, nous utilisons la propriété que possèdent les atomes à s'échanger, de manière aléatoire au sein d'un gaz en équilibre isotopique (THIBAUT 1972). Nous pouvons donc utiliser la formule suivante :



Les atomes de ^{14}N et de ^{15}N sont donc combinés entre eux statistiquement de manière aléatoire selon l'équation :

$$(p + q)^2 = p^2 + 2 pq + q^2$$

où p représente le nombre d'atomes de masse 14 et q celui de masse 15, p^2 sera donc la probabilité d'obtenir des molécules 28, 2 pq des molécules 29, et q^2 des molécules 30.

Il est facile de mesurer le rapport :

$$R = \frac{^{14}\text{N } ^{15}\text{N}}{^{14}\text{N } ^{14}\text{N}} = \frac{29}{28} = \frac{2pq}{p^2} = \frac{2q}{p} \quad (\text{I})$$

par définition : $A = \frac{1/2(29+30)}{28+29+30} \times 100 \quad (\text{I})$

donc $A = \frac{q}{p+q} \times 100$ et en divisant numérateur et dénominateur par p, on obtient :

$$A = \frac{q/p}{1+q/p} \cdot 100$$

de (I) on déduit :

$$A = \frac{100 \cdot R}{2+R} \quad (\text{II})$$

De la même façon, dans le cas d'un composé fortement enrichi, on pourra mesurer le pic 30 et calculer R' :

d'où l'on tire : $R' = 30/29$

$$A = 200 \cdot R' / (1 + 2 R') \quad (\text{III})$$

Si le gaz est en équilibre isotopique, les valeurs calculées par les trois formules (I, II, III) seront identiques. C' est le cas dans l'analyse par la méthode RITTENBERG. Le cas contraire traduit la présence d'un gaz polluant. Dans la pratique, la pollution la plus probable est la présence d'air. Si la contamination n'est pas trop importante, une mesure effectuée dans de telles conditions peut être corrigée de différentes façons :

* l'estimation du pic 32 ($^{16}\text{O}_2^+$) permet de calculer la contribution de l'azote de l'atmosphère aux pics 28 et 29. D'autres molécules peuvent être à l'origine de ce pic : CO, N₂O.... De plus, la présence de O₂ ne traduit pas nécessairement une fuite d'air, car il peut se former au cours de la conversion. Nous avons donc préféré une seconde méthode :

* l'argon de l'air, m/z=40, est la source la plus probable du pic 40. La lecture de ce pic permet de corriger celles des pics 28 et 29 et de faire une estimation correcte de l'abondance isotopique de l'échantillon.

Malgré cette possibilité de correction, les contaminations par de l'air atmosphérique doivent être évitées et les échantillons contenant plus de 5 % d'air sont rejetés.

IV.1.3. Expression des résultats

* L'excès isotopique, E % ou enrichissement est égal à la différence entre l'abondance isotopique de l'échantillon et celle d'un étalon de référence. Dans le cas de l'azote l'étalon de référence sera l'azote de l'atmosphère dont l'abondance isotopique est égale à 0,3663 ± 0,0004 % (JUNK et SVEC 1958).

$$E \% = A \% \text{ échantillon} - A \% \text{ étalon}$$

Dans la pratique, nous utilisons uniquement la grandeur E %, Par exemple, si on fait pousser une plante sur un sol ayant l'abondance naturelle en ^{15}N , a, et si on ajoute un engrais marqué dont l'abondance est A_e , la quantité d'azote, Q_N , exporté dans la plante, représente la somme des quantités d'azote «x» venant de l'engrais et «y» du sol. On a :

$$Q_N = x + y$$

La teneur moyenne en ^{15}N de la plante est notée Apl. :

$$Q_N \cdot \text{Apl} = (x \cdot A_e) + (y \cdot a)$$

avec $y = Q_N - x$

on arrive à :

$$Q_N \cdot \text{Apl} = x \cdot A_e + (Q_N - x) \cdot a$$

$$x = Q_N \cdot \frac{\text{Apl} - a}{A_e - a}$$

Nous voyons que l'abondance isotopique n'intervient pas directement et l'on peut remplacer (Apl - a) et (A_e - a) par Epl et E_e donc :

$$x = Q_N \cdot \frac{\text{Epl}}{E_e}$$

et $y = Q_N \cdot \left(1 - \frac{\text{Epl}}{E_e}\right)$

* Définitions agronomiques

- Le Coefficient Réel d'Utilisation, (C.R.U.), d'un engrais est le pourcentage d'azote de l'engrais qui est utilisé par la plante. Ce C.R.U. a été défini par opposition au Coefficient Apparent d'Utilisation (C.A.U.) qui est obtenu par différence avec une parcelle témoin non fertilisée.

$$\text{C.R.U. (\%)} = \frac{Q_N \cdot \text{Epl}}{F \cdot E} \cdot 100$$

avec Q_N : la quantité d'azote dans les parties aériennes.

F : le fertilisant azoté

- Nitrogen derived from the fertilizer (N.d.f.f.) est le pourcentage d'azote de la plante provenant de l'engrais ajouté.

Nous avons vu précédemment que la quantité d'azote issue de l'engrais «x» était donné par la formule :

$$x = Q_N \cdot \frac{E_{pl}}{E}$$

$$\text{Donc N.d.f.f. (\%)} = \frac{x}{Q_N} \cdot 100$$

$$= \frac{E_{pl}}{E} \cdot 100$$

Cette formule ne nécessite que la mesure des excès isotopiques. Nous notons que la quantité d'engrais apporté et la quantité d'azote exporté n'apparaissent pas.

IV.2. Techniques appliquées au carbone.

IV.2.1. Dosage chimique du carbone

Le dosage chimique du carbone est effectué, sur des échantillons secs et broyés, par la méthode de combustion par voie sèche et coulométrie. L'appareil utilisé est un Carmhomat 8 ADG Wothoff. Dans ce dispositif, le CO résiduel, libéré lors de la combustion (à 1000 °C) des échantillons, est ensuite oxydé par le Cuprox interposé dans le courant d'oxygène. Celui-ci permet d'acheminer l'ensemble du CO₂ produit vers la cellule de mesure. Ce CO₂ est piégé dans une solution de soude dont on mesure l'augmentation de la conductivité. Une courbe étalon est nécessaire, car une relation linéaire entre la quantité de C de l'échantillon et la variation de conductivité de la soude carbonatée n'existe que pour de faibles valeurs.

IV.2.2. Dosage isotopique du carbone

Le dosage de la quantité de radioactivité contenue dans un échantillon a été faite sur une prise d'essai différente de celle qui a servi au dosage du carbone total. Cependant, la pesée des deux échantillons se fait au même instant, afin d'éviter les variations d'humidité des échantillons de sol et de plantes. Le ¹⁴C contenu dans de tels échantillons est recueilli après combustion dans une solution de Carbosorb additionnée d'un scintillant, le Permafluor.

La quantité totale de l'isotope actif est égale à :

$$Q^{14}\text{C} = \text{R.A.S.} * Q_{\text{C}}$$

L'originalité de la méthode utilisée réside dans l'association des fractionnement physiques et biologiques avec le traçage de certaines parties du cycle du carbone et de l'azote. Cette association est indispensable pour interpréter des phénomènes de minéralisation et d'organisation de l'azote dans les systèmes sol-plante. Elle devrait, en outre, permettre d'améliorer l'adéquation entre les compartiments conçus pour les besoins de la modélisation et les fractions que l'on sait isoler au laboratoire:

La mesure du rayonnement β^- de faible énergie, émis par les atomes de ^{14}C , en scintillation liquide, doit se faire de manière à éviter l'atténuation, où Quenching, dû à la couleur ou la composition de cette solution.

IV.2.3. Expression des résultats

La mesure de la Radioactivité de l'échantillon doit s'exprimer en Béquerel, Bq ou ses multiples. Rappelons que :

$$1 \text{ Béquerel} = 1 \text{ d.p.s.}$$

et $1 \text{ micro-curie} = 3,7 * 10^4 \text{ d.p.s.}$

Un radioisotope est presque toujours accompagné de ses autres isotopes qui seront dosés par la voie chimique. Le rapport entre la quantité de radioactivité et la masse chimique Q_{C} de l'élément est appelé Radio Activité Spécifique, R.A.S..

$$\text{R.A.S.} = \text{Radioactivité} / Q_{\text{C}}$$

III PARTIE

EXPERIENCES AU CHAMP

Bilan et cinétique de l'organisation et de la minéralisation de l'azote

INTRODUCTION

Il a été antérieurement établi, en conditions de culture contrôlées, avec un coefficient réel d'utilisation optimal (80 %), que 60 % de l'azote organisé restant au niveau du sol sont de nature racinaire et non microbienne (HETIER et al. 1980). C'est également le cas dans certaines cultures effectuées au champ sur des sols sableux très pauvres en matière organique humifiée (FELLER 1979).

Dans le cas d'un sol relativement riche en matière organique et où les reliquats azotés des apports antérieurs sont importants, on peut se demander s'il en est de même.

C'est à cette question que nous allons tenter de répondre en examinant les résultats des cultures effectuées au champ et en case lysimétrique.

Depuis fort longtemps, les agronomes se sont intéressés à l'évolution de la matière organique des sols dont la minéralisation ne parvient à libérer que moins de la moitié de l'azote assimilé ensuite par les cultures (GUIRAUD 1984). Des essais ont donc été mis en place à ROTHAMSTED dès 1843 (LAWES et GILBERT 1895), et à GRIGNON, en 1875 (DEHERAIN 1876, 1889), afin de suivre l'évolution du stock organique du sol en fonction d'apports annuels de nature variée (paille, compost.....). Cependant, dans certains cas, il n'est pas possible de faire apparaître directement des différences entre les traitements mis en place au cours de ces essais de longue durée. Pour cela, il faut faire des cultures en serre utilisant des traceurs et notamment de l'azote 15 , afin de différencier, dans l'azote exporté, la quantité qui est fournie par le sol de celle qui provient de l'engrais. De tels essais ont été mis en place notamment par GUIRAUD, qui a pu ainsi noter des variations du pouvoir minéralisateur du sol en fonction du traitement, alors que le rendement en matière sèche ne révélait aucune différence interprétable.

Plus récemment, les écologistes et les pédologues ont focalisé leur intérêt sur l'étude de l'organisation de l'azote des engrais qui seul peut améliorer le statut organique des sols. L'explication précise des phénomènes d'organisation ne peut être établie qu'à l'aide d'expériences rigoureusement conduites au laboratoire. De telles expériences amènent des conclusions qu'il est nécessaire de vérifier au champ.

La mise en place d'essais au champ, intégrant au mieux dans leur protocole l'ensemble des connaissances antérieures, se heurte à un certain nombre de difficultés. En effet, les aléas climatiques peuvent modifier le déroulement prévu et masquer l'effet du traitement effectué (FARDEAU 1977). De plus, l'hétérogénéité inhérente aux agrosystèmes amène à accroître la taille des échantillons de plantes et de sol, ce qui se traduit par une élévation, parfois insupportable, du coût des expériences. Cependant, ces essais ne doivent pas être abandonnés car ils représentent une vérification finale des expériences menées dans un premier temps au laboratoire.

Compte tenu de l'expérience acquise par les chercheurs de l'I.T.C.F. (associés à ceux de l'INRA) d'une part et GUIRAUD d'autre part, nous avons mis en place des essais au champ permettant de suivre au mieux la cinétique de l'organisation des nitrates apportés et de leur percolation au cours d'un cycle d'une culture de maïs et de l'hiver qui a suivi.

Les protocoles déjà énoncés dans la II^{ème} partie sont décrits dans le détail en annexe. Rappelons que nous avons apporté un engrais azoté sur des parcelles et sur une case lysimétrique, laquelle représente un modèle intermédiaire entre le champ et les vases de végétation utilisés en serre. Dans chacun des cas, le choix de l'excès isotopique de l'azote apporté est un compromis entre le coût de la fumure azotée marquée et les objectifs fixés.

En effet, pour suivre la cinétique de l'organisation des nitrates, il nous a fallu suivre non seulement le compartiment minéral de l'azote, mais aussi l'apparition du traceur dans les différentes fractions du système sol-plante :

** les percolats ont été recueillis à partir de la case lysimétrique, sur laquelle l'excès de l'azote apporté est de 11 %.

** l'azote minéral et son organisation au niveau du sol ont été suivis, à l'aide de prélèvements intermédiaires de sol, sur une parcelle voisine de la case (ceci afin de ne pas perturber l'écoulement de l'eau), où l'excès de l'azote apporté est de 18,5 %.

** l'exportation de l'azote a été suivie, à l'aide de prélèvements de plantes. Dans ce cas, l'azote apporté a un excès de 1 %.

Pour faciliter la compréhension, nous avons rapporté les résultats à excès initial et production de matière sèche égaux. Afin de quantifier, les phénomènes bruts d'organisation et de minéralisation et ainsi mieux apprécier les transferts réels s'effectuant, durant une période définie, entre les différentes fractions azotées du système sol-plante, il est nécessaire d'évaluer, à chaque instant la quantité d'azote présent dans le système.

Pour cela, plusieurs modèles mathématiques ont été proposés (CAMPBELL et al 1976) nécessitant ou non la mise en place d'essais utilisant des isotopes (JANSSON 1958).

KIRKHAM et BARTHOLOMEV (1954 ; 1955) ont défini «o» l'organisation brute et «m» minéralisation brute, à partir d'un système d'équations différentielles. Pour résoudre ce système, les auteurs posent comme condition que «m» et «o» sont constants durant l'intervalle de temps, c'est-à-dire que la quantité d'azote minéral varie de façon linéaire au cours du temps. Dans ce cas, ils définissent «m» et «o» de la façon suivante :

$$m = \frac{x - x_0}{t} \cdot \frac{\log_e \left(\frac{y}{b} - \frac{x}{a} \right) / \left(\frac{xy_0}{bx_0} - \frac{x}{a} \right)}{\log_e \left(\frac{X_0}{X} \cdot \frac{a - x}{a - x_0} \right)}$$

$$o = m - \frac{x - x_0}{t}$$

t représente le temps.

«m» et «o» les vitesses de minéralisation et d'organisation.

«a» et «x» les quantités d'azote total et d'azote minéral total du système.

«b» et «y» la quantité d'azote total marqué et d'azote minéral total marqué du système.

Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode de calcul proposée par GUIRAUD (1984). On détermine, dans ce cas, «O». En effet, il est facile de chiffrer, pour un intervalle de temps donné, la diminution de l'azote 15 dans la fraction d'azote minéral du sol. Si l'on admet l'hypothèse que l'excès de cet azote minéral varie de façon linéaire au cours du temps, il est possible de calculer la quantité d'azote qui est «ôté» à ce compartiment, quantité appelée OT de la façon suivante :

$$OT = \frac{X_0 E_0 - XE}{\frac{E_0 + E}{2}}$$

avec : X et X_0 la quantité d'azote minéral et E et E_0 l'excès aux temps t et t_0 .

Symétriquement, on peut déterminer la quantité totale d'azote correspondant à la somme de ce qui a été organisé au niveau du sol (par la voie microbienne et racinaire), exporté au niveau des parties aériennes et perdu (par lixiviation et/ou dénitrification et /ou volatilisation). Dans ce cas, TO , ou quantité totale d'azote transféré durant le temps T, représente la somme de chacun de ces paramètres, soit :

$$TO = OB + EB + PB$$

avec $OB = Om.B + Or.B$ où OB = Organisation Brute au niveau du sol
Om.B : par la voie microbienne
Or.B : par la voie racinaire

EB : exportation Brute par les parties aériennes

PB : perte Brute pour l'horizon 0 - 60 cm

Chacune des composantes de TO est le résultat du quotient de la quantité d'azote 15, apparue dans ce compartiment durant la période considérée par l'excès isotopique moyen calculé de l'azote minéral pour la même période.

Par ailleurs, si l'azote de l'engrais ne subit aucune pertes par volatilisation et/ou dénitrification, la quantité d'azote minéral «ôtée» du compartiment minéral est égale à celle organisée dans les différents compartiments du système sol-plante. Dans ce cas précis .

$$TO = OT$$

Avec de tels moyens expérimentaux et un tel mode de calcul, nous allons tenter de mettre en évidence l'existence d'un cycle de minéralisation - organisation dont le temps moyen de résidence correspond au cycle annuel d'une culture ou à des périodes privilégiées plus courtes. Pour cela, nous examinerons, dans le premier chapitre, la répartition de l'azote apporté à la récolte puis à la sortie de l'hiver qui a suivi celle-ci. Le deuxième chapitre traitera de la cinétique d'évolution de l'azote minéral durant les mêmes périodes. Les conclusions, tirées de ces deux chapitres feront l'objet d'un troisième.

CHAPITRE I - REPARTITION DE L'AZOTE DE L'ENGRAIS ET DU SOL AU COURS D'UN CYCLE ANNUEL

Rappel des protocoles

Nous avons effectué un apport unique, de nitrate de calcium, (apport de 140 kg N/ha. avec un E % de 11,22) au semis, sur une case lysimétrique et sur une parcelle de plein champ, afin de pouvoir quantifier, outre l'azote exporté au niveau des parties aériennes, le pourcentage d'azote engrais lixivié au cours et après la culture. La transposition des mesures d'azote perdu par les systèmes sol-plantes dans les percolats de la case lysimétrique n'est faite qu'en tenant compte des limites d'interprétations habituellement retenues par les hydrodynamiciens. Dans ce cas précis, le volume de la case et son ancienneté nous autorisent à accorder une certaine confiance à cette transposition.

Pour faciliter la comparaison des résultats obtenus à partir de la case à ceux de la parcelle ouverte (apport de 140 kg N/ha. avec un E % de 18,48), les valeurs des excès ont été ramenées dans ce même système d'unité.

I.1. Etat initial du sol (Mai 1984)

Les caractéristiques pédologiques du sol brun alluvial calcaire utilisé, figurent en annexe. Rappelons que ce sol présente une texture équilibrée et une teneur en matière organique proche de 8 % (C = 4 %) dans les 30 premiers cm.

TABLEAU N° 1 : PROFIL D'AZOTE (MINERAL ET ORGANIQUE) AVANT LA CULTURE

DATE	PROF cm	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	N minéral Total	N organique
		kg N/ha.	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha.
24/04/84	0-20	29,00	3,60	32,60	4050
	20-40	30,00	4,30	34,20	3720
	40-60	30,30	2,40	32,70	2160
	60-80	51,90	3,00	54,90	2220
	80-100	60,00	2,40	62,40	1800
			(Total)	216,80 (20%) *	13950

(* Les chiffres entre parzntèses représentent le coefficient de variation)

Nous constatons au tableau n° 1 que plus de 50 % de l'azote minéral se trouve, essentiellement sous forme de nitrates, dans la couche 60-100 cm au moment du semis. Compte tenu du précédent (pois), nous pensons que cet azote minéral représente le reliquat azoté, qui sera, comme nous le verrons plus loin, lixivié au cours du premier mois de la culture.

La fertilisation localisée, que nous avons pratiquée, se traduit par un apport supplémentaire de 140 kg N/ha. (E % 18,5 % soit 26 kg ^{15}N /ha.) dans la couche 0-20 cm.

I.2. Etat du système sol-plante en fin de culture (Octobre 1984)

En ce qui concerne l'apport d'azote marqué, nous nous intéresserons tout d'abord aux pertes par lixiviation, puis aux formes minérales et organiques restées dans le sol et enfin aux prélèvements par les plantes.

I.2.1. Pertes d'azote minéral par lixiviation (entre le 25/05 et le 01/10/84)

Les percolats ont été recueillis au-delà de 100 cm ; dans la plupart des cas la répartition de l'azote minéral dans le sol a été seulement mesurée dans les trois horizons 0-20 ; 20-40 et 40-60 cm en raison de l'impossibilité pratique de pénétrer dans la couche 60-100 cm. Nous serons donc amenés à estimer la quantité d'azote minéral ainsi que l'état des réserves en eau de cette couche.

L'azote perdu dans les percolats l'a été exclusivement sous forme minérale (essentiellement nitrique) et nous n'avons pas mesuré de quantités significatives d'azote organique.

Les chiffres du tableau n° 2 représentent la quantité totale d'azote percolé, ainsi que son excès moyen, au moment de la récolte.

TABLEAU N° 2 : AZOTE (TOTAL ET ^{15}N) LIXIVIE
AU COURS DE LA CULTURE
(résultats exprimés à l'hectare)

DATE	Q ^{15}N kg N/ha.	E %	Q ^{15}N kg ^{15}N /ha.
entre le 25/04/84 et 01/10/84	77,50	0,205	0,159

Sur la totalité de l'azote percolé, l'azote de l'engrais apporté ne représente qu'une très faible partie (1,1 %), soit 0,6 % de l'apport. C'est pourquoi nous pensons qu'il s'agit là d'une perte correspondant au 3/4 (79 kg sur les 111 kg de la couche 60-100 cm) du reliquat de la fertilisation antérieure, dont nous avons noté la présence avant la culture.

I.2.2. Répartition de l'azote de l'engrais à la récolte (Octobre 1984)

a) Dans le sol

Les analyses des quantités d'azote minéral et organique ont été faites, à la récolte, sur les trois horizons de la couche 0-60 cm (tableau n° 3).

Voir Tableau N° 3 page suivante.

A cette date, près de dix pourcent (10 %) de l'azote engrais apporté se retrouve dans le sol sous forme minérale, essentiellement nitrique, dont 5 % ont déjà gagné la couche 40-60 cm. D'autre part, la mesure de la quantité de ^{15}N sous forme organique est accompagnée d'une erreur relative d'autant plus élevée qu'à l'hétérogénéité de marquage, s'ajoute l'hétérogénéité d'échantillonnage. Compte tenu de cette réserve, l'azote engrais organisé, au moment de la récolte, représente 21,50 % de l'apport et 0,3 % de la totalité du stock d'azote organique de la couche 0-60 cm. Il faut remarquer que le stock d'azote organique des horizons 0-20 cm et 20-40 cm, ont diminué au cours de la culture (respectivement de 4050 kg N/ha. à 3600 kg N/ha. et 3720 kg N/ha. à 3390 kg N/ha.).

Nous constatons, (tableau n° 4) que 80 % du N organisé dans l'horizon 0-20 cm se trouvent dans cette fraction inférieure à 50 μm , dont nous savons, par ailleurs, (HETIER et al 1986), que près des 3/4 peuvent être considérés comme provenant de l'exsudation racinaire et de l'organisation microbienne.

TABLEAU N° 4 : FRACTIONNEMENT DE L'AZOTE ORGANIQUE
(prélèvement du 01/10/84 horizon 0-20 cm)

	QN	E %	Q ^{15}N
	kg N/ha.		kg N/ha.
Sol total	3600	0,100	3,60
Fraction 50 μm	2620	0,110	2,88
Fraction 50 μm (calculé)	980	0,074	0,72

TABLEAU N° 3 : PROFIL D'AZOTE (MINERAL ET ORGANIQUE) A LA RECOLTE

DATE	PROF. cm	AZOTE MINERAL				AZOTE ORGANIQUE				
		NO ₃ kg N/ha.	E %	NH ₄ ⁺ kg N/ha.	E %	N minéral total kg N/ha.	Q _N kg N/ha.	E %	% ENGRAIS	
24/04/84	0-20	32,10	0,82	11,30		43,40	1,00	3600	0,100	14,00
	20-40	20,10	1,63	6,10	0,780 ens.	26,20	1,40	3390	0,040	5,50
	40-60	31,20	6,17	5,10		36,30	7,40	2340	0,020	2,00
						105,90	9,80			21,50

b) Azote organisé par la plante (tableau n° 5)

* Exportation au niveau des parties aériennes

TABLEAU N° 5 : BILAN A LA RECOLTE : REPARTITION DE L'AZOTE, L'ENGRAIS ET DU SOL, DANS LA PLANTE (résultats exprimés à l'hectare)

	Q_N kg N/ha.	E %	N.d.f.f. %	C.R.U. %
PARTIES AERIENNES				
Tiges - Feuilles	101,20 (5%)*	5,30 %	28,80 %	20,60 %
Grains	171,90 (10%)*	4,90 %	26,60 %	32,40 %
Rafle	7,50 (5%)*	5,20 %	28,30 %	1,50 %
Total P.A.	280,60	5,05 %	27,40 %	54,50 %
RACINES	42,10 (estimé)	6,50 %	35,30 %	10,50 %
TOTAL PLANTE	322,70	5,20 %	28,30 %	65,00 %

Il n'y a pas d'azote minéral dans les parties aériennes.

Durant sa croissance, le maïs a utilisé 55 % de l'azote de l'engrais (C.R.U. = 55 %), ce qui représente 27 % des 280 kg N exporté par hectare au niveau des parties aériennes (N.d.f.f.).

Près de 60 % de l'azote total et de l'azote 15 exportés se localisent au niveau des grains ; l'enfouissement des pailles ne représentent donc au mieux qu'un apport de 110 kg N/ha..

* Organisation au niveau des racines

Devant l'impossibilité pratique d'extraire, au champ, la totalité de la masse racinaire, nous l'avons estimée par calcul.

* Les chiffres entre parenthèses représentent les coefficients de variation

Sachant que, dans le cas du maïs, la quantité d'azote racinaire correspond à 15 % de l'azote exporté par les parties aériennes, nous en déduisons que l'organisation racinaire représente 42 kg N total/ha. (HETIER et al 1980). Par ailleurs, un prélèvement des racines dans l'horizon 0-20 cm nous a permis d'estimer qu'environ la moitié de la biomasse racinaire se localise dans cet horizon. L'excès isotopique de l'azote de cet échantillon de racines, considéré comme représentatif est de 6,50 %. On en déduit, premièrement que 35 % de l'azote racinaire provient du fertilisant et que environ 10 % de cet azote a donc été organisé au niveau des racines grossières.

c) Bilan récapitulatif dans le système sol-plante

Pour essayer d'interpréter les résultats de ce bilan, il est nécessaire de tenir compte de l'évolution du stock d'eau du sol durant la culture (tableau n° 6).

Le stock d'eau d'une couche de sol au temps t_1 est égal à :

$$S_{t_1} = 10 (\text{Hu \%} \times Z \text{ en cm})$$

avec Hu % : humidité volumique

La variation du stock d'eau entre t_1 et t_2 est donc :

$$\Delta S_{t_2 - t_1} = S_{t_2} - S_{t_1}$$

Dans notre étude, nous n'avons mesuré qu'une seule fois, avant le semis, la quantité d'azote et le stock d'eau dans la couche 60-100 cm. Pour tenir compte de son évolution durant la culture, nous nous appuyerons sur les bilans hydriques du tableau n° 6, où apparaît la variation du stock d'eau qui est égale à la différence entre les entrées représentées par les Pluies (P) et l'eau d'Irrigation (I), et les sorties représentées par l'Evapo-Transpiration Potentielle (E.T.P.) et le Drainage (D).

$$\Delta S_{t_2 - t_1} = (P + I) - (E.T.P. + D)$$

Rappelons, que l'eau percolée a été recueillie au-delà de 100 cm. Ayant mesuré la variation du stock d'eau dans la couche 0-60 cm, il nous est possible de déterminer la variation de ce stock dans la couche sous-jacente 60-100 cm, de la façon suivante :

$$\Delta S_{0-60 \text{ cm}} + \Delta S_{60-100 \text{ cm}} = (P + I) - (E.T.P. + D)$$

$$\Delta S_{60-100 \text{ cm}} = (P + I) - (E.T.P. + D) - \Delta S_{0-60 \text{ cm}}$$

Le tableau n° 6 fait état des résultats de ce calcul.

Voir Tableau N° 6 page suivante.

TABLEAU N° 6 : EVOLUTION DU STOCK D'EAU DURANT LA CULTURE
(résultats exprimés en mm/m²)

	SEMIS 25/04/84	13/06/84	09/07/84	21/08/84	RECOLTE 01/10/84
ENTREES					
Pluie		167,30	25,60	26,10	80,90
Irrigation		0,00	35,00	138,70	110,50
SORTIES					
E.T.P.		90,00	184,00	179,00	115,00
Drainage		64,30	10,00	0,00	5,50
STOCK EAU					
0-20 cm	45,00	45,00	51,00	45,00	47,10
20-40 cm	51,00	51,90	36,90	38,10	43,50
40-60 cm	48,00	48,00	34,50	32,10	35,00
TOTAL 0-60 cm	144,00	144,90	122,40	115,20	125,60
60-100 cm	96,00	108,10	- 2,80	- 9,80	50,70
		*	*	*	*

(Les chiffres avec une * sont calculés).

Nous constatons, tout d'abord, qu'au moment du semis (Avril 1984), le sol est proche de la saturation sur toute sa profondeur. En effet, nous mesurons un stock d'eau de 144 mm alors que, à la capacité de rétention (égale à 28 % d'humidité volumique) il est de 168 mm.

Par contre, au moment de la récolte (Octobre 1984), la couche 60-100 est très sèche (30 % de la C.R.), alors que les couches supérieures sont toujours proches de la saturation (80 %), grâce à l'irrigation. Sur le terrain, cela s'est traduit par le fait que cette couche était résistante à toute pénétration de la tarière à moteur.

Cette dessiccation durant la culture, correspond à un abaissement du stock d'eau vers des valeurs presque nulles. Ces valeurs sont même dans deux cas, négatives à cause de la surestimation de l'E.T.P., calculée selon la formule de Penman.

Afin d'essayer d'estimer la quantité d'azote présente dans les 51 mm d'eau de la couche 60-100 cm, il nous faut faire deux hypothèses :

1 - l'azote minéral soluble dans l'eau subit les mêmes mouvements qu'elle.

2 - l'écoulement est de type «Piston Flow» et le remplacement d'une couche d'eau se fait par un apport d'une quantité identique qui a précédemment saturé les horizons supérieurs.

Sur la base de ces hypothèses, l'examen des chiffres du tableau n° III.II.5. en annexe montre que la quantité d'eau qui a percolé juste après la récolte (du 06/11/84) est de 40 mm soit la presque totalité de l'eau présente dans la couche 60-100 cm à la récolte, or ce percolat contient 69 p.p.m. d'azote, soit 27,60 kg (et 1,22 kg ¹⁵N). Les entrées d'eau (de l'ordre de 70 mm) étant suffisantes pour amener la couche 0-60 cm à saturation, nous pouvons donc estimer que cette quantité d'azote, était présente dans cette couche à la récolte.

Avec cette valeur estimée, le bilan récapitulatif de l'azote apporté est présenté dans le tableau n° 7.

TABLEAU N° 7 : BILAN A LA RECOLTE : REPARTITION DE L'AZOTE DE L'ENGRAIS DANS LE SYSTEME SOL-PLANTE
(résultats exprimés à l'hectare)

	Q _N	E %	N.d.f.f.	Q ¹⁵ N	ENGRAIS
	kg N/ha.		%	kg ¹⁵ N/ha.	%
APPORT	140,00	18,50	/	26,03	100,00 %
N perdu par le système sol					
N exp. P.A.	280,60 (5%)	5,05	27,40	14,20	54,50
N lixivié (hors 0-100 cm)	77,00	0,190	1,00	0,10	0,60
N dans le sol (0-60 cm)					
N minéral	105,90 (10%)	2,50	13,60	2,60	9,80
N organique					
racines	42,10	6,50	35,30	2,70	10,50
sol	9330,00 (5%)	0,060	0,30	5,60	21,50
N minéral dans la couche 60-100 cm	27,00	4,40	23,90	1,20	4,60
BILAN					101,50

Pour apprécier les phénomènes bruts, nous appliquons la méthode de calcul proposée par GUIRAUD (1984).

La formule :

$$OT = \frac{E_o X_o - EX}{E_o + E} = \frac{229,3 \times 11,35 - 105,9 \times 2,54}{11,35 + 2,54} = 336 \text{ kg N/ha.}$$

nous permet de calculer une valeur OT, (Quantité d'azote «ôté», au compartiment minéral) s'élevant à 336 Kg N/ha.

Nous constatons que OT est inférieur à la valeur O.n Nous verrons dans le chapitre II quelles interprétations peuvent être proposées pour expliquer cette différence. (page 40).

En résumé, l'engrais apporté se répartit dans le sol de la façon suivante :

* il n'y a pas eu de perte de ^{15}N au cours de la culture. Dans nos conditions de culture, les phénomènes de dénitrification ou de volatilisation n'ont qu'une importance mineure et non décelable.

* cinquante cinq pourcent (55 %) de l'apport ont été exportés au niveau des parties aériennes.

* les 45 % de l'apport qui restent dans le sol sont répartis de la façon suivante :

- N minéral 9,8 % dans la couche 0-60 cm
4,6 % dans la couche 60-100 cm

- Dix pour cent cinquante (10,50 %) organisés au niveau des racines grossières

- Un fractionnement granulométrique dans la couche 0-20 cm nous a montré que nous pouvions attribuer au moins 20 % de l'azote organique restant (soit 21,50 % de l'apport) à des débris fins et très fins, soit :

- N organisé par la voie racinaire 10,50 % + 4,30 % = 14,80 %

- N organisé par la voie microbienne : 17,20 %

I.3. Etat du système sol à la sortie de l'hiver (Mars 1985)

Après la récolte, le dispositif a été laissé en place, puis une nouvelle série d'analyses a été effectuée à la fin de l'hiver. Comme précédemment, nous examinerons tout d'abord, les pertes d'azote par lixiviation avant de nous intéresser au sol.

I.3.1. Azote soustrait par lixiviation (Tableau N° 9)

TABLEAU N° 9 : AZOTE (TOTAL ET ^{15}N)
LIXIVIE AU COURS DE
L'HIVER SUIVANT LA
CULTURE
(résultats exprimés à l'hectare)

DATE	QN kg/ha.	E %	Q ^{15}N kg/ha.
Entre le 01/10/84 et 26/03/85	98,00	4,33	4,240

La quantité d'azote percolé durant l'automne et l'hiver, suivant la récolte est de 98 kg N/ha. (avec un E % moyen de 4,33 % soit une quantité de ^{15}N égale à 4,24 kg ^{15}N /ha.), soit une quantité sensiblement inférieure à celle présente, sous forme minérale dans le sol (0-100 cm) à la récolte (105 + 27 = 132 kg N/ha. tableau N° 7).

Quelle est l'origine de cet azote entraîné par les précipitations hors du sol. Pour tenter de répondre à cette question, nous avons procédé à des prélèvements intermédiaires de sol et de percolats. Avant d'aborder cette étude cinétique, nous observerons les conséquences de ces soustractions sur la composition de la fraction azotée du sol.

I.3.2. Azote présent dans le sol (Mars 1985)

Après avoir divisé la parcelle dite ouverte, nous avons prélevé, fin Janvier 1985, dans l'une des deux moitiés, l'ensemble du système racinaire de la couche 0-20 cm, afin de soustraire, dans ce cas, la contribution des racines à la production d'azote minéral. Cependant, nous n'avons pas constaté à la fin de l'hiver, de différence significative, sur l'azote minéral total, ni sur son excès isotopique, entre les deux demi-parcelles.

Voir Tableau N° 10 page suivante.

La quantité, d'azote minéral, présentée dans la couche 0-60 cm est de 47 kg N/ha. avec un excès isotopique moyen de 0,25 %, ce qui ne représente que 0,4 % de l'apport initial d'engrais marqué.

Afin d'estimer la quantité d'azote présente dans la couche 60-100 cm, nous pouvons faire le même calcul qu'antérieurement. Cependant, le volume des percolats recueillis après le 26/03/85 est inférieur au stock d'eau présent dans la couche 60-100 cm.

TABLEAU N° 10 : PROFIL D'AZOTE (MINERAL ET ORGANIQUE) A LA SORTIE DE L'HIVER (16/03/85)

DATE	PROF cm	AZOTE MINERAL				AZOTE ORGANIQUE				
		NO ₃		NH ₄ ⁺		Total N minéral		ENGRAIS		
		kg N/ha.	E %	kg N/ha.	E %	kg N/ha.	%	kg N/ha.	E %	%
24/04/84	0-20 cm	10,50 (20%)	0,270	6,00	0,190	16,50	0,15	3660	0,040	5,60
	20-40 cm	10,50 (20%)	0,270	4,80	0,170	15,30	0,14	2670	0,025	2,60
	40-60 cm	9,90 (20%)	0,300	5,40	0,110	15,30	0,14	2640	0,030	3,00
						47,10	0,43			11,20

(Les chiffres entre parenthèses représentent les coefficients de variation)

Nous constatons qu'à la sortie de l'hiver, l'azote organique du sol ne contient plus que 11 % de l'apport initial contre 22 % au moment de la récolte. Ici encore, c'est surtout au détriment de l'horizon de surface que s'effectue la soustraction d'azote, bien que le stock total ait peu varié. Cette différence correspond à 2,8 kg $^{15}\text{N}/\text{ha}$.

Nous reviendrons dans le chapitre suivant sur le devenir de cet azote.

I.4. Conclusions

Au cours de la culture, la plante a exporté, au niveau des parties aériennes, 55 % de l'azote de l'engrais. Environ quinze pourcent de cet apport a été organisé par la voie racinaire. Quantitativement, cette voie de l'organisation est du même ordre de grandeur que l'organisation microbienne. Seule une partie du reliquat azoté a été lixivié hors du profil au cours de la culture. Le fertilisant, dont 15 % est dans le sol sous forme minérale n'a subi aucune perte ni par lixiviation, ni par volatilisation et/ou dénitrification. Ce dernier point indique que les quantités d'azote «ôtées» du compartiment minéral sont égales à celles apparues dans les différents compartiments du système sol-plante. Nous pouvons donc écrire que :

$$\text{TO} = \text{OT}$$

(Cette égalité sera reprise dans le chapitre suivant)

Les pertes survenues après la récolte montrent que, au cours de l'hiver, 16 % de l'apport initial a été soustrait du système sol par lixiviation.

CHAPITRE II - CINÉTIQUE DE L'ORGANISATION ET DE LA MINÉRALISATION DURANT UN CYCLE ANNUEL

Introduction

Grâce aux calculs du chapitre précédent, nous sommes en possession du bilan de l'azote total et de son traceur d'une part à la récolte et d'autre part à la fin de l'hiver qui a suivi. De plus, nous avons tenté de quantifier, au niveau du sol, l'importance respective de l'organisation racinaire et microbienne durant la culture.

Par ailleurs, nous avons également quantifié les phénomènes d'organisation brute, à l'aide de la méthode de calcul, «delta Q ^{15}N », proposée par GUIRAUD. Il est apparu que cette valeur OT calculée est inférieure à celle de O_n obtenue en faisant la somme des quantités nettes d'azote organisé dans le sol, exporté et perdu pour le sol 0 - 60 cm.

Cette différence indique que la valeur réelle de l'excès moyen de l'azote «ôté» au compartiment minéral, est inférieure à celle utilisée dans le calcul et qui est établi par simple interpolation linéaire.

Pour aller plus loin dans l'explication de ces résultats, nous allons exploiter les analyses effectuées au cours des prélèvements de plantes, de sol et de percolats réalisés tout au long de la culture et durant l'hiver qui a suivi.

En rétrécissant ainsi le pas de temps de l'étude, nous pourrions mieux apprécier la cinétique d'organisation de l'azote minéral et celle des pertes par exportation et lixiviation qui font suite à la minéralisation de la matière organique du sol.

On peut se demander tout d'abord :

- * si ces deux phénomènes sont simultanés.
- * si les échanges entre azote minéral et azote organique mettent en évidence l'existence d'un compartiment azoté caractérisé par un temps de résidence court.

Nous tenterons de répondre à ces questions en examinant successivement les cinétiques d'organisation et de minéralisation durant la période de croissance du maïs, puis durant la période hivernale.

II.1. Au cours de la culture (25/05/84 au 01/10/84)

Le destin de l'azote minéral, (organisation racinaire ou microbienne, pertes par lixiviation, volatilisation ou dénitrification), est fonction à la fois des conditions physico-chimiques du sol (Ph, Eh, T, humidité.....) et des besoins nutritifs de la plante.

Nous allons donc examiner l'évolution du compartiment d'azote minéral au cours de la culture.

II.1.1. Evolution de l'azote minéral du sol

Nous avons placé, sur la Figure N° 1, l'évolution de la valeur de l'excès de l'azote minéral au cours du temps (les quantités d'azote minéral, leur excès respectif apparaissant sur le tableau en annexe III.II.1).

Voir Figure N° 1 page suivante.

Nous constatons immédiatement que l'excès ne varie pas de façon linéaire au cours du temps, l'excès moyen réel était inférieur à l'excès calculé, ce qui explique que OT est inférieur à O.n.

En l'absence de discrimination isotopique, toute diminution de la valeur de l'excès suppose :

- (i) une entrée d'azote non marqué dans le compartiment minéral.
- (ii) simultanément, une sortie d'azote marqué, qui accentue la baisse des valeurs d'excès isotopique.

Nous avons fait apparaître, sur les Figures n° 2 et 3, l'évolution des quantités d'azote total et de ^{15}N en fonction du temps (le détail des valeurs apparaît au tableau III.II.1. en annexe).

Voir Figures N° 2 et 3 pages suivantes.

Ces courbes montrent une diminution des quantités d'azote minéral total et d'azote ^{15}N au cours du temps. La pente de la droite $\text{QN} = f(t)$ joignant les points déterminés au semis et à la récolte est inférieure à celle de la droite correspondant à $\text{Q}^{15}\text{N} = f(t)$. Il en est de même pour les droites obtenues avec des pas de temps plus courts, au moins jusqu'au prélèvement de Juillet. Après cette date, au contraire, on note une remontée plus grande des quantités de N total. Nous pouvons donc conclure que non seulement une partie de l'azote minéral marqué et non marqué quitte ce compartiment, mais aussi, que, simultanément de l'azote organique du sol fournit une quantité appréciable d'azote minéral.

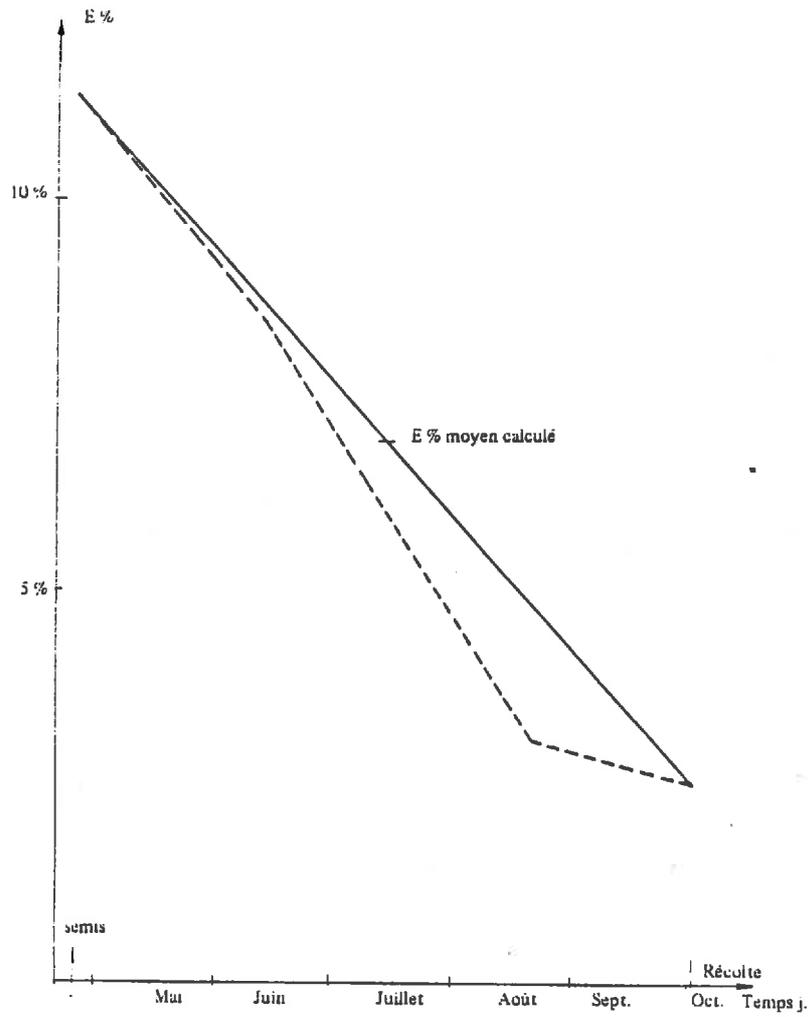


Figure N° 1 : Evolution de l'excès de l'N minéral de la couche de sol 0-60 cm au cours de la culture

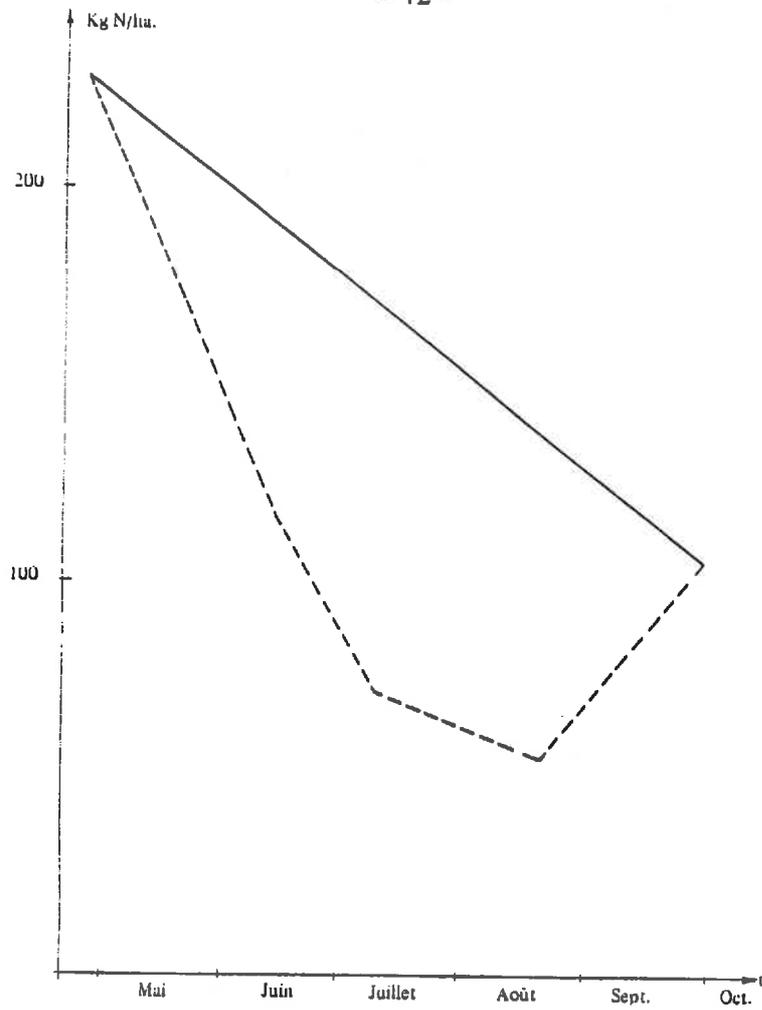


Figure N° 2 : Evolution de la quantité d'N total minéral de la couche 0-60 cm de sol au cours de la culture

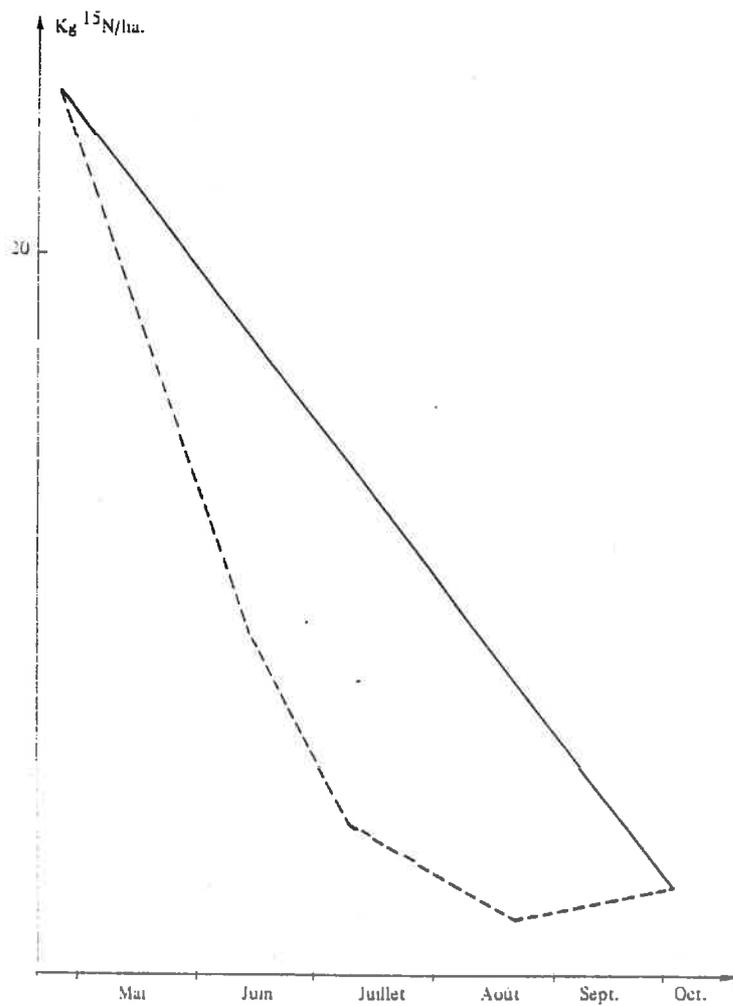


Figure N° 3 : Evolution de la quantité de ¹⁵N minéral de la couche 0-60 cm de sol au cours de la culture

Avant de chiffrer ces phénomènes, nous allons nous intéresser à la cinétique d'organisation de l'azote minéral au niveau du sol, à son exportation par les parties aériennes, ainsi qu'aux pertes par lixiviation, c'est-à-dire les composantes de l'OU précédemment défini.

II.1.2. Cinétique d'exportation, d'organisation, et de lixiviation

Nous avons séparé, dans ce paragraphe la partie concernant l'exportation de l'azote vers les parties aériennes de celle qui traitera de l'organisation racinaire et microbienne du sol et des pertes par lixiviation.

a) Exportation

Les exportations ont été calculées à partir de prélèvements périodiques de plants de maïs ayant crû sur des parcelles voisines qui avaient reçu, au semis, 140 kg N/ha. d'azote sous forme de nitrate d'ammonium. Cette opération est légitime, compte tenu du fait que cette expérience a montré que les coefficients réels d'utilisation de nitrate et de l'ammonium étaient identiques. Nous avons donc ramené les résultats à production et excès initial égaux. Pour essayer de situer l'origine de l'azote absorbé, durant un intervalle de temps donné, nous avons également calculé l'excès global de cet azote. Ces résultats apparaissent sur le Tableau N° 11.

Voir Tableau N° 11 page suivante.

Nous constatons que :

* durant la première période (25/05 au 13/06), l'azote absorbé a un excès (13,69 %) proche de celui de l'azote minéral présent dans la couche 0-20 cm. (tableau III-II-1 en annexe)

* durant la seconde période (13/06 au 09/07), l'excès de l'azote absorbé (5,40 %) est inférieure à celui de l'azote minéral de l'ensemble des couches de 0 à 60 cm.

* durant les mois de Juillet et Août (09/07 au 21/08), l'excès de l'azote exporté par les parties aériennes est égal à 0,77 %, alors que durant la même période l'azote nitrique et ammoniacal de ces trois couches, ont respectivement un excès de 4,74 % et 0,40 %, ces valeurs moyennes cachent une grande disparité. En effet, l'azote nitrique de la couche 0-20 cm a un excès proche de celui de l'azote exporté pendant ce même mois (0,65 %), alors que l'azote minéral de la couche profonde (40-60 cm) a un excès de 9,80 %. Il apparaît donc que la plante s'alimenterait préférentiellement aux dépens de l'azote minéral présent dans la couche superficielle. Ce résultat ne nous surprend pas car d'autres auteurs ont montré (CALLOT et al 1982), que les parties proximales des racines participent plus activement à la nutrition minérale des parties aériennes que les parties distales, qui ne s'alimentent que pour assurer leur propre métabolisme. La faible distance entre les parties aériennes et ces parties basales limite la perte de charge et favorise donc l'exportation de l'azote absorbé à ce niveau.

*pour les excès de
azote absorbé, voir l'annexe III-II-1*

* durant la période suivante (Septembre), on assiste à une stabilisation des exportations d'azote total, alors que la quantité d'azote 15 continue d'augmenter. Ceci indique, étant donné que nous avons une quantité d'azote constante, qu'une certaine quantité d'azote marqué est venue remplacer une quantité identique moins marquée qui a été transférée vers le système sol-racines. Ce prélèvement ne saurait se produire aux dépens de l'azote minéral de la couche 0-20 cm dont l'excès (0,65 %) ne peut expliquer l'augmentation de l'excès de l'azote exporté.

Une source d'azote, plus fortement marqué que celui déjà présent dans les plantes a forcément été mise à contribution. Or, l'examen des résultats du Tableau III.1. situé en annexe, nous indique que l'azote minéral de la couche 40-60 cm a un excès de 9,80 %. De plus, les chiffres du tableau III.2.3 en annexe montrent que la quantité de ^{15}N de la couche 60-100 cm diminue durant la période précédant la récolte. Il n'y a pas de perte de lixiviation durant cette période. C'est donc la remontée, par la solution du sol, de l'azote minéral de cette couche, entraînant l'azote nitrique de la couche 40-60 cm, qui peut expliquer cette exploitation d'azote 15 en fin de culture.

Ajoutons que le prélèvement d'azote par la plante d'une quantité d'azote fortement marqué masque la baisse du Coefficient Réel d'Utilisation, généralement constatée, en fin de culture (GUIRAUD 1984).

La représentation graphique des cinétiques d'absorption de l'azote et de son traceur, (Figure 4), confirme ces observations.

Voir Figure N° 4 page suivante.

Nous constatons une forte exportation d'azote entre mi-Juin et fin Août. Durant la dernière période, l'absorption d'azote non marqué se stabilise tandis que celle d'azote 15 continue de croître comme cela a été démontré antérieurement.

Après avoir constaté la différence de cinétique d'incorporation de l'azote total et de l'azote 15, nous pouvons nous intéresser aux caractéristiques de l'incorporation de l'azote de l'engrais dans la fraction de l'azote organique du sol.

b) Organisation (annexe III-II-2)

Il ne nous a pas été possible de quantifier séparément, pour chacun des prélèvements de sol, l'importance respective de l'organisation racinaire et de l'organisation microbienne. L'organisation racinaire n'a été définie qu'à la récolte. Durant la culture, l'azote minéral qui a été organisé par cette voie a été comptabilisé, arbitrairement, avec l'azote présent dans la couche de sol 60-100 cm.

Son importance par rapport à l'azote présent dans cette couche croît au cours de la culture. Cependant, la mesure finale de l'organisation racinaire (Or B) permet, malgré tout, de différencier à la récolte, l'azote minéral présent dans cette couche de l'azote racinaire.

*Plus tôt dans ce
cas pour l'azote*

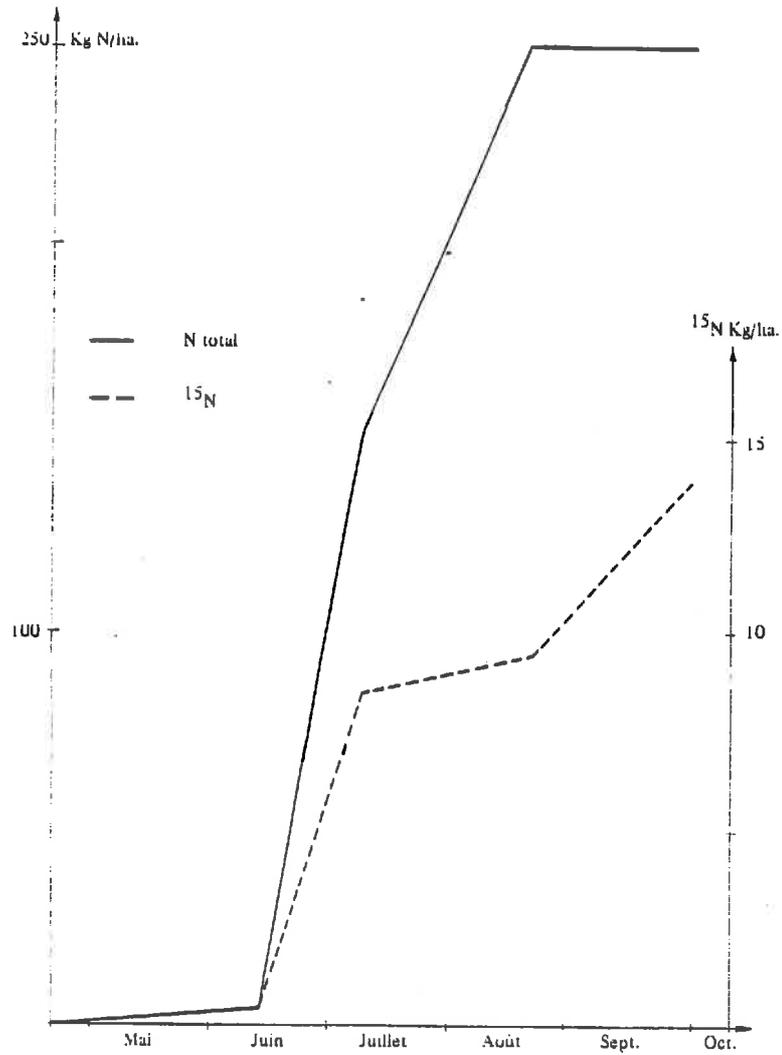


Figure N° 4 : N total et ¹⁵N exporté au cours du temps

Ce paragraphe ne traitera donc que de l'organisation microbienne.

Les quantités d'azote total nouvellement organisé dans le sol n'étant pas analytiquement décelables, nous ne pouvons pas calculer un excès global pour le supplément d'azote organisé pour chacune des périodes considérées.

Nous pouvons estimer, par calcul, la quantité d'azote minéral (OB) qui se trouve organisée au niveau du sol, à un moment donné. Ce OB calculé est égal au quotient de la quantité d'azote 15 , apparue dans la fraction d'azote organique du sol par l'excès moyen de l'azote quittant le compartiment minéral.

Voir Figure N° 5 page suivante.

Nous constatons, par la figure n° 5, l'existence d'une organisation particulièrement faible pendant l'avant dernière période, durant laquelle l'exploitation est en revanche particulièrement intense (Figure n° 4).

Ceci correspond à une variation presque nulle des quantités de 15 N organique au cours du mois d'Août (de 3,15 Kg N/ha. à 3,66 Kg N/ha.). Nous ne pouvons avancer aucune explication définitive faute de preuves expérimentales. Cependant, comme la moitié de l'organisation résulte de l'héritage de l'organisation racinaire (Conf. CHAPITRE I), il est vraisemblable que cet héritage interviendra surtout pendant la période de sénescence des racines, donc au cours de la période du 21/08 à 01/10. Comme nous avons constaté précédemment qu'une importante quantité d'azote minéral remonte à cette époque, celle-ci peut contribuer également à la reprise de l'activité microbienne.

Pour compléter l'étude de la cinétique de la répartition de l'azote minéral, il faut maintenant prendre en compte l'azote perdu par lixiviation dans la couche 60-100 cm et dans les percolats.

c) Lixiviation

L'azote recueilli dans les percolats est totalement perdu pour la plante, tandis que l'azote de la couche 60-100 cm peut être éventuellement utilisé par celle-ci.

Les quantités d'azote percolées ainsi que celles présentes dans la couche 60-100 cm, présentées au Tableau III.II.3. en annexe, montrent que durant les mois de Juillet et d'Août, les pertes par percolation ont été nulles ; auparavant, l'excès de l'azote percolé étant proche de zéro. Il s'agissait donc de la sortie du profil de l'azote minéral présent au départ de la culture. Le système fonctionne bien selon le principe du Piston Flow comme cela a été mis en évidence depuis longtemps par les hydrodynamiciens du sol.

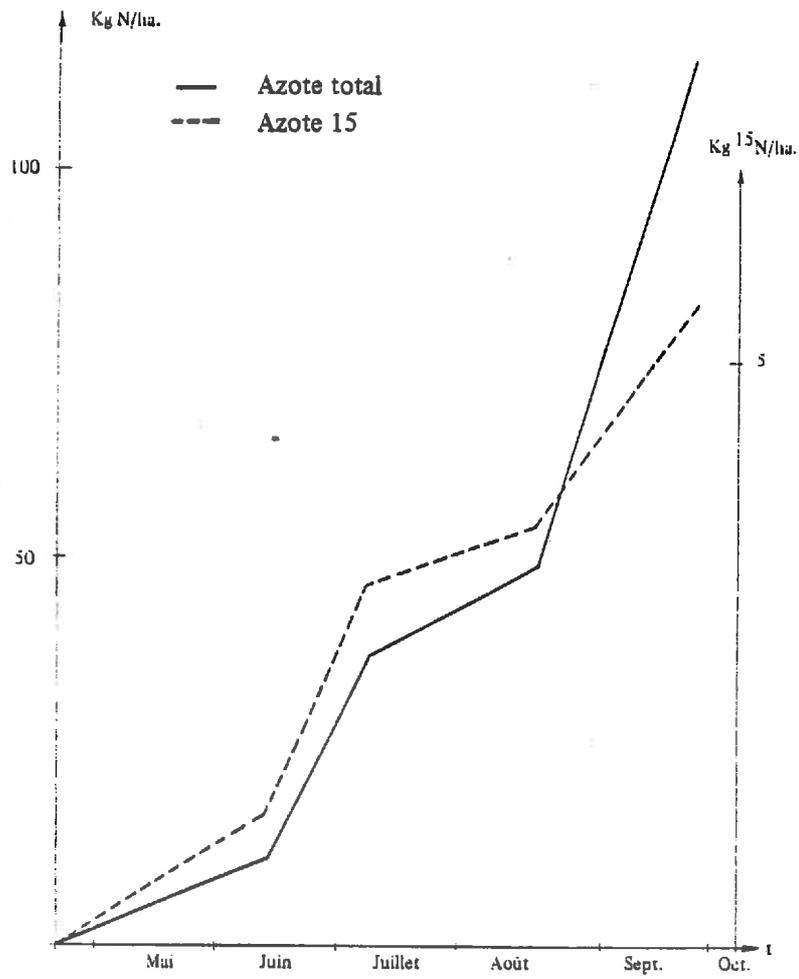


Figure N° 5 : Organisation Brute (OB) au cours de la culture

De plus, 55 % de l'azote apporté au semis se trouvait, un mois et demi après son apport, dans la couche 60-100 cm. Cette quantité diminue légèrement pendant les deux premiers mois, sans pour autant alimenter la nappe phréatique. Cette diminution est plus importante durant la dernière période (7,63 kg $^{15}\text{N}/\text{ha}$).

Rappelons que cette quantité a été calculée par différence pour les points intermédiaires, compte tenu du fait que les points initiaux et finaux indiquent qu'il n'y a pas de pertes. Elle comprend l'azote ^{15}N contenu dans les racines vivantes qui n'est pas comptabilisé dans l'azote organique du sol. Cette quantité d'azote racinaire a été évaluée au moment de la récolte, à 2,70 Kg $^{15}\text{N}/\text{ha}$, soit une quantité bien inférieure à cette diminution de 7,63 kg $^{15}\text{N}/\text{ha}$ constatée par le calcul.

Cette constatation nous amène à invoquer la remontée d'azote minéral vers les couches superficielles, qui explique d'une part, l'augmentation de ^{15}N dans les parties aériennes (4,5 kg $^{15}\text{N}/\text{ha}$. Tableau n°11) et d'autre part, dans l'azote organique (1,84 kg $^{15}\text{N}/\text{ha}$.) via la réorganisation microbienne, ou par de la rhizodéposition. (tableau III-II-2 en annexe)

Ces constatations renforcent l'explication proposée par CALLOT et al sur le rôle des racines proximales et distales.

Après avoir examiné, séparément chacun des compartiments (azote minéral, azote organique du sol, azote exporté par les parties aériennes, azote racinaire et enfin l'azote perdu par percolation, nous allons intégrer, dans le paragraphe suivant, l'ensemble des résultats dans un bilan complet de la cinétique des différents phénomènes.

II.1.3. Bilan du devenir de l'azote durant la culture

Nous avons vu précédemment, qu'en utilisant la méthode de calcul proposée par GUIRAUD, nous pouvions chiffrer la quantité d'azote «ôté» du compartiment minéral, ceci en s'appuyant sur le delta Q ^{15}N de ce compartiment; symétriquement, on peut suivre l'apparition de l'azote ^{15}N dans les différents compartiments azotés du système sol-plante : Exportation, Organisations racinaire et microbienne et Pertes.

Pour l'azote exporté par la plante, nous pouvons chiffrer les quantités d'azote, des parties aériennes, de deux façons :

1) calculer, selon la méthode proposée l'azote total exporté ; pour obtenir Exportation Brute (EB).

2) mesurer, à l'aide de prélèvements intermédiaires de plantes l'azote exporté au cours d'une période définie. Il s'agit alors des Exportations Nettes (EN).

a) Azote exporté par la plante. Comparaison des valeurs de EB et EN

Rappelons, que les conditions dans lesquelles ont été faits les prélèvements intermédiaires de plantes (2 pieds, par prélèvements) nous conduisent à un coefficient de variation bien supérieur à celui obtenu à partir des mesures effectuées sur les douze pieds de la récolte (13 %). Cependant, de tels résultats restent intéressants, car même une variation de 100 % sur la mesure de l'excès isotopique n'est pas de nature à changer les interprétations proposées.

Voir Tableau N^o 12 page suivante.

Nous allons pouvoir, à l'aide des chiffres du tableau n^o 12, comparer les valeurs de (EN), tirées du tableau n^o 11, et celles de EB. Nous les avons calculées en appliquant :

- soit l'excès moyen de l'azote minéral de la couche 0-20 cm (méthode A) ;
- soit celui de la couche 20-40 cm (méthode B) ;
- soit celui de la couche 40-60 cm (méthode C) ;
- soit celui de l'ensemble de la couche 0-60 cm (méthode D).

Nous constatons que :

i) il y a identité presque parfaite entre les valeurs de EN et celle de EB, calculée selon la méthode A pour la première période et selon la méthode B pour la seconde période. A ce stade de développement, le système racinaire de la plante n'explore donc que la couche superficielle du sol.

ii) pour les deux dernières périodes, il y a une totale discordance entre ces deux valeurs.

Cela est particulièrement significatif pour la période précédant la récolte (21/08/84 à 01/10/84). En effet, le supplément d'azote total exporté avant la récolte, apparaît comme nul, alors que le delta Q ¹⁵N augmente. Le calcul de l'excès de l'azote absorbé s'avère donc impossible. Pour expliquer ce paradoxe, nous allons utiliser les calculs d'Exportation Brute (EB) qui par définition permettent de situer l'importance des transferts Plante-Racines-Sol et Sol-Racines-Plante. Pour la dernière période, la valeur de l'excès, utilisée dans ce calcul, est donc trop faible. Par contre, la valeur de EB obtenue par la méthode C donne un ordre de grandeur tout à fait admissible (57,3 kg N/ha). Deux explications sont possibles :

*) dans le cadre d'une absorption préférentielle d'azote dans les couches superficielles, il faut admettre que les nitrates à excès élevé qui ont atteint ces couches par remontée capillaire évoquée précédemment, ont été totalement absorbés par la plante.

TABLEAU N° 12 : CALCULS DE L' EXPORTATION BRUTE (EB) :
COMPARAISON AVEC L' EXPORTATION NETTE (EN)

METHODE A : avec l'excès moyen de l'azote minéral de la couche 0-20 cm						
METHODE B : avec l'excès moyen de l'azote minéral de la couche 20-40 cm						
METHODE C : avec l'excès moyen de l'azote minéral de la couche 40-60 cm						
METHODE D : avec l'excès moyen de l'azote minéral de la couche 0-60 cm						
PERIODE	Delta EN Kg/ha.	E % N absorbé	Delta Q ¹⁵ N (Kg/ha.)	E % N miné.	EB Kg/ha.	
SEMIS				A	9,65	6,00
/	4,25	13,69	0,580	B	4,25	13,60
13/06/84				C	5,50	10,50
				D	9,91	5,90
13/06/84				A	3,30	242,40
/	148,35	5,40	8,000	B	5,50	145,50
09/07/84				C	10,75	74,40
				D	7,45	107,40
09/07/84				A	1,67	49,10
/	106,40	0,80	0,820	B	2,10	39,00
21/08/84				C	10,15	8,10
				D	4,78	17,20
21/08/84				A	0,72	636,10
/	0,00	Impossible	4,580	B	1,65	277,60
01/10/84				C	8,00	57,30
				D	2,83	161,80

***) ces nitrates remontés des couches profondes n'ont pas dépassé la couche 40 - 60 cm, où ils ont été absorbés.

Dans les deux cas, le fait le plus important qui ressort de ces résultats est l'ampleur de la rhizodéposition (50 à 60 kg N/ha), particulièrement sensible durant le mois précédant la récolte.

Nous pouvons désormais intégrer l'ensemble des résultats dans un bilan complet de la cinétique d'organisation et de minéralisation de l'azote du sol.

b) Récapitulation

Nous avons regroupé, au tableau n° 13, les différentes valeurs des composantes de TO au cours de la culture.

En faisant leur somme pour chaque période, nous obtenons la quantité totale d'azote réparti, dans le système sol-plante, ceci au détriment de l'azote minéral.

**TABLEAU N° 13 : CALCULS DE TO : POUR LES
PRELEVEMENTS INTERMEDIAIRES**
(résultats exprimés en kg N/ha.)

	SEMIS 25/04/84	13/06/84	09/07/84	21/08/84	RECOLTE 01/10/84
Composantes de TO					
OB (r et m)		11,9	26,4	10,7	65,0 (annexe III-II-2)
EB		5,9	107,3	17,3	161,6 (tableau 12)
PB		143,8	- 61,4	37	- 267,6 (annexe III-II-3)
(Somme)	TO	161,6	72,3	65,0	- 41,0

Nous pouvons de plus, comparer, pour un intervalle de temps donné, la somme des valeurs de TO de chaque période constituant cet intervalle, à celle calculée sur l'ensemble de celui-ci selon la formule :

$$TO_{\text{entre } t_0 \text{ et } t_1} = EB_{t_0 - t_1} + OB_{t_0 - t_1} + PB_{t_0 - t_1}$$

avec par exemple :

$$EB_{t_0 - t_1} = \frac{X_1 - X_0}{\frac{E_1 + E_0}{2}}$$

$X_1 - X_0$: quantité de ^{15}N qui apparaît dans le compartiment entre t_0 et t_1

$\frac{E_1 + E_0}{2}$: excès moyen calculé de l'azote minéral durant le temps $t_0 - t_1$

TABLEAU N° 14 : VALEURS INTERMEDIARES ET TOTALES DE TO
(résultats exprimés en kg N/ha.)

SEMIS	13/06	09/07	21/08	RECOLTE 01/10
T O (Tab. N°13)	161,6	72,3	65,0	- 41,0
		+ 233,9		
T.O calculé pour les périodes considérées	239,1		+ 298,9	
		336,0		+ 257,9
			336,0	

Nous constatons une égalité presque parfaite entre la valeur de TO calculée pour l'intervalle de temps allant du semis au 09/07/84, et la somme des deux valeurs intermédiaires.

Par contre, le calcul de TO, pour l'intervalle allant du semis au 21/08/84 donne une valeur supérieure à celle obtenue en faisant la somme des valeurs intermédiaires : cela signifie que l'excès moyen calculé de l'azote minéral, sur cet intervalle de temps est supérieur aux valeurs réelles.

Nous attribuons cette différence à la composante EB du calcul de TO. En effet, nous avons vu précédemment que la plante s'alimente aux dépens de l'azote présent dans les couches superficielles, dont l'excès est inférieur à la moyenne calculée des excès utilisée dans le calcul.

La même constatation peut être faite pour la dernière période de calcul, ou la différence entre les valeurs de TO, calculées selon les deux méthodes, est de 74 kg N/ha., soit une quantité voisine de celle transférée des parties aériennes vers le système sol-racines. (page 52).

De plus, la valeur de TO calculée pour l'ensemble de cet intervalle (semis-récolte) est identique à celle obtenue par le même calcul, sur la période semis - 21/08/84. Nous pensons que cette égalité traduit des transferts d'azote dans lesquels le compartiment minéral de la couche 0-40 cm n'intervient pas, et ainsi conforte les observations précédentes sur les remontées d'azote nitrique de la couche 60-100 cm et les transferts bidirectionnels d'azote entre le sol et la plante durant le mois précédant la récolte.

Durant la culture, nous avons vu que tous les phénomènes observés peuvent être expliqués par le jeu du lessivage et de la remontée des nitrates, au moins de la couche 60-100 cm et éventuellement de la couche 40-60 cm vers les couches superficielles. Dans ces conditions, rien ne nous oblige à conclure à l'existence d'un cycle organisation-minéralisation dont la durée soit inférieure à celle de la culture, soit une centaine de jours. Les quantités de matière organique concernée par la minéralisation peuvent être évaluées grâce au calcul des valeurs «MT» qui définissent, selon la formule suivante, les quantités d'azote organique minéralisées :

$$MT = OT + (Y_t - Y_o) \quad (I)$$

(Y_o et Y_t représentent respectivement les quantités de N total minéral au temps 0 et t

A l'aide des chiffres du bilan de la répartition de l'azote de l'engrais à la récolte, nous avons établi qu'aucune pertes d'azote par dénitrification et ou volatilisation ne s'étaient produites au cours de la culture. Comme nous l'avons défini antérieurement (introduction 3ème Partie), nous pouvons ainsi conclure que, pour les différentes périodes considérées, la quantité d'azote minéral «ôté» du compartiment minéral (OT) est égale à celle organisée dans les différentes fractions du système sol-plante (TO). Nous pouvons calculer, en appliquant la formule-(I), les valeurs de MT (tableau n° 15 page suivante).

Nous constatons que MT, la quantité d'azote organique minéralisée durant la culture est au total égale à environ 140kg N/ha. Cette quantité est très inférieure à celle organisée durant la même période ($OT = 260$ kg N/ha.). Il apparaît donc que l'organisation a été durant cette culture plus intense que la minéralisation.

II.2. Au cours de l'hiver suivant la récolte (01/10/84 au 26/03/85)

Nous avons vu dans le chapitre précédent que l'excès de l'azote minéral, présent dans la couche 0-60 cm, ne permet pas d'expliquer celui de l'azote perdu dans les percolats recueillis après la récolte.

Nous allons examiner l'évolution de l'azote minéral de la couche 0-60 cm et l'azote perdu par lixiviation, au cours de l'hiver suivant la récolte.

II.2.1. Evolution de l'azote minéral dans la couche 0-60 cm (les différentes valeurs utilisées pour les Figures 6 à 8 sont données au Tableau IIII.4. en annexe)

Nous constatons sur la Figure n° 6 (page suivante) que l'excès de l'azote minéral de la couche 0-60 cm chute brutalement durant la première période après la récolte, ce qui traduit une minéralisation de l'azote natif du sol. De plus, nous voyons sur la Figure 7 (page suivante) qu'il se produit durant cette période une diminution de la quantité d'azote 15 et d'azote total.

TABLEAU N° 15 : CALCULS DE MT
(résultats exprimés en kg N/ha.)

	DATE	SEMIS	13/06	09/07	21/08	RECOLTE 01/10
N minéral	QN	229,30	117,90	72,00	55,50	105,90 (annexe III-II-1)
	Delta QN	- 111,40	-45,90	- 16,50	50,40	
	TO = OT	161,60	72,30	65,00	- 41,00	(tableau 13)
	MT	50,20	26,40	48,50	9,40	TOTAL 134,50

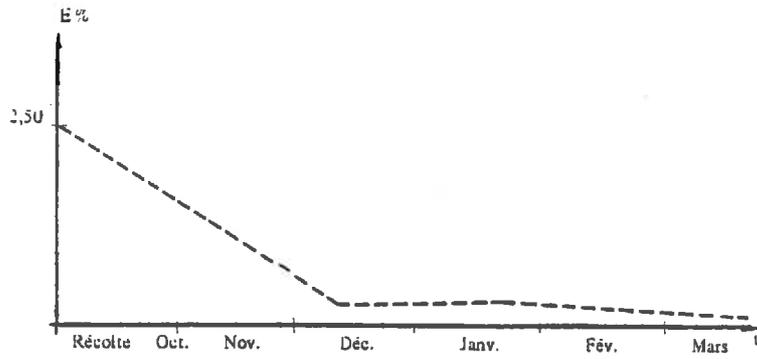


Figure N° 6 : Evolution de l'E % de l'azote minéral de la couche 0-60 cm de sol après la récolte

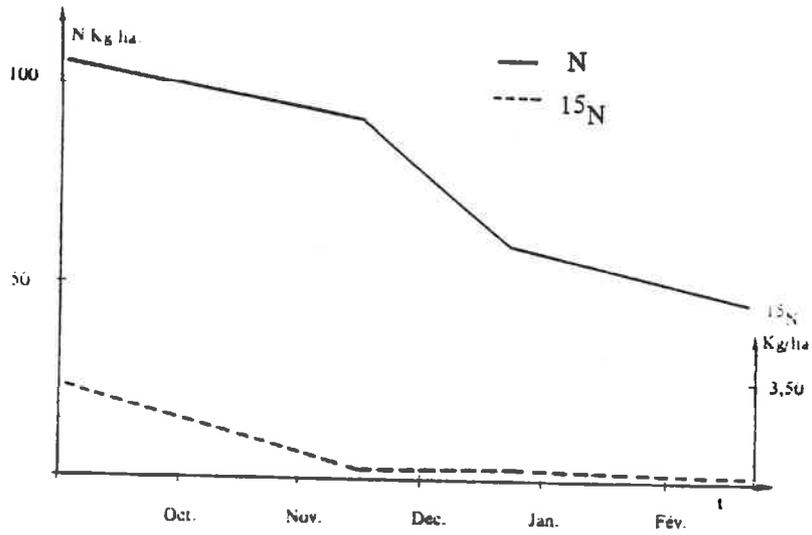


Figure N° 7 : Evolution de N total et ¹⁵N minéral dans la couche 0-60 cm du sol après la récolte

Durant les périodes suivantes (hiver), il y a une stabilisation de la valeur de l'excès de l'azote minéral, ainsi qu'une faible variation de la quantité d'azote et de la quantité d'azote 15 . Ces résultats mettent donc en évidence un arrêt de l'activité biologique durant l'hiver.

II.2.2. Evolution de l'azote des percolats

A la fin de l'hiver, nous avons recueilli 98 kg N/ha. (Tableau III.II.5. en annexe) (avec un excès isotopique global de 4,40 %, soit 4,32 kg 15 N/ha.) dans les percolats.

On peut se demander comment se répartissent ces pertes au cours du temps et quelle est l'origine de l'azote lixivié.

Nous allons examiner la Figure 8 (page suivante) représentant schématiquement l'évolution du stock d'eau et de l'azote minéral (nitrique) du sol au cours de l'hiver. (page 33 et annexe III-II-5).

i) Nous avons vu, dans le chapitre I, que l'azote percolé, entraîné par les 70 mm de pluie, entre 01/10/84 et le 06/11/84 (27 kg N/ha., E % = 4,43) correspond à l'azote minéral présent à la récolte, dans la couche 60-100 cm (flèche 1 de la Figure 8). Pour tenter de trouver l'origine de l'azote percolé après cette date, il faut donc soustraire cette quantité à la quantité totale recueillie, soit :

$$\text{Percolat total} - \text{Percolat du 06/11/84} = \text{Percolat après 06/11/84}$$

$$98 - 27 = 71 \text{ kg N/ha.} \quad (\text{I})$$

De la même façon pour l'azote 15 :

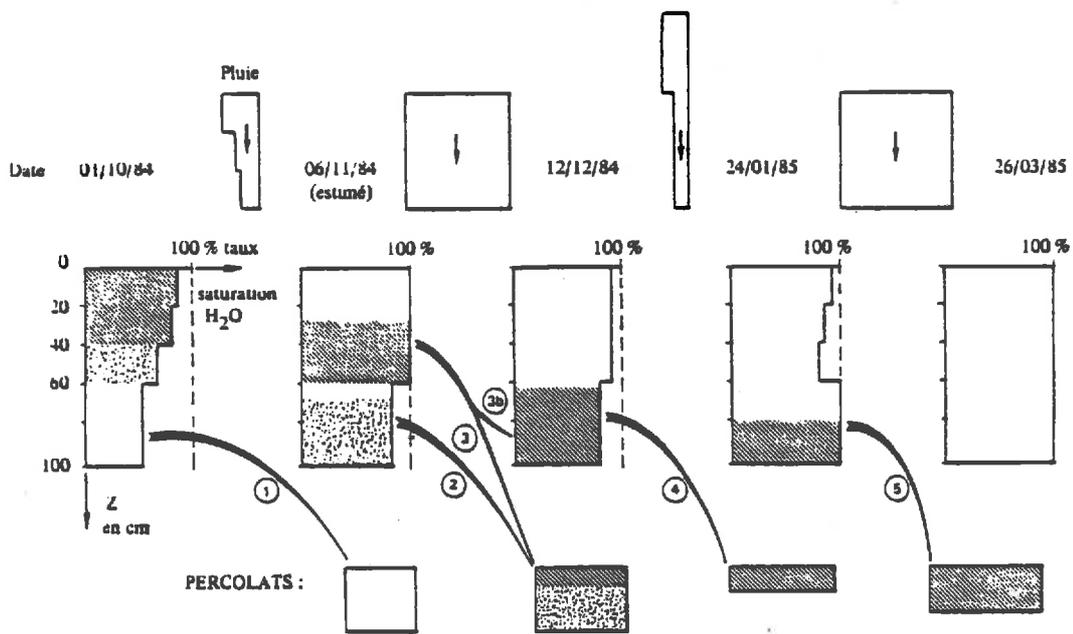
$$4,32 - 1,22 = 3,10 \text{ kg } ^{15}\text{N/ha.} \quad (\text{II})$$

C'est l'origine de cet azote que nous allons essayer d'élucider.

Il est tombé, entre 06/11/84 et le 12/12/84, 157 mm d'eau (Tableau III.2.6. annexe) (227 - 70 = 157 mm). Cette quantité est suffisante pour amener la couche 0-60 cm à saturation et ainsi «chasser» l'azote minéral présent dans cette couche. L'azote qui sort de la couche 0-60 cm va d'une part gagner la couche 60-100 cm, (flèche 3 bis - Figure 8) où l'on mesure une augmentation de 1,2 kg 15 N/ha. et d'autre part, être recueilli dans les percolats du 12/12/84 (2,00 kg 15 N/ha.) (flèche 3).

Pour la période suivante, 12/12/84 au 24/01/85, les précipitations ont été de 52 mm. Celles-ci ont provoqué d'une part la saturation du profil et d'autre part, ont entraîné une partie de l'azote minéral de la couche 60-100 cm hors du profil (flèche 4).

Si l'on estime que l'azote de ces percolats est représentatif de l'azote minéral présent dans la couche 60-100 cm, nous pouvons dire que l'azote minéral de cette couche a un excès isotopique de 4,23 %.



Remarque : les différents symboles utilisés ne sont présentés que pour faciliter la compréhension. en aucun cas leur surface ne représente des quantités d'azote.

Figure N° 8 : Représentation schématique de l'évolution du stock d'eau et de l'azote minéral du sol au cours de l'hiver

De plus, les précipitations, qui sont tombées entre le 24/01/85 et le 26/03/85, (159 mm) sont suffisantes pour saturer le sol (0-60 cm), et donc provoquer la percolation de l'azote minéral de la couche 60-100 cm.

Nous pouvons donc estimer que l'azote qui a été recueilli dans les percolats, entre le 12/12/84 et le 26/03/85 correspond à l'azote minéral présent le 12/12/84 dans la couche 60-100 cm (flèches 4 et 5, Figure 8), dont l'excès a été estimé à 4,23 %.

L'azote qui percole entre le 06/11/84 et le 26/03/85 correspond à de l'azote qui est perdu par la couche 0-60 cm durant la période allant du 01/10/84 au 12/12/84 dont une partie était le 06/11/84 dans la couche 60-100 cm.

Dans ces conditions en posant :

1 - Q_o les pertes d'azote total du compartiment organique de la couche 0 - 60 cm, du système sol entre le 01/10/84 et le 12/12/84

Q_{15} les pertes d'azote 15 correspondantes. Cette quantité est égale à 1,98 kg 15 N/ha (avec un coefficient de variation de 5 %).

Il faut rappeler que la précision qui accompagne l'estimation de la variation, du stock d'azote total sous forme organique, dans ce cas précis Q_o , ne permet pas de chiffrer cette grandeur. Nous allons tenter, à l'aide des équations exposées ultérieurement, d'évaluer Q_o et ainsi calculer l'excès isotopique. E_o de la fraction organique qui alimente les percolats.

2 - Q_m les pertes d'azote total du compartiment minéral de la couche 0 - 60 cm du système sol entre le 01/10/84 et le 12/12/84.

Q_m^{15} les pertes d'azote 15 correspondantes qui sont égales à 2,45 kg 15 N/ha (tableau III-II-4 en annexe).

Cependant, l'azote (total et 15 N) qui disparaît du compartiment minéral peut être soit réorganisé, dénitrifié (réactions regroupées sous le terme P) soit effectivement lixivié (composante L). Seul ce dernier paramètre nous intéresse .

Ainsi :

$$Q_m = L + P$$

et

$$Q_m^{15} = L^{15} + P^{15}$$

3 - Q_p l'azote total recueilli dans les percolats après le 06/11/84, quantité égale à 71 kg N/ha 9annexe III-II-5).

Q_p^{15} l'azote 15 de ces percolats : 3,1 kg 15 N/ha (tableau III-II-5 en annexe).

On peut établir deux équations :

- Equation matière :

$$L + Q_o = Q_p \quad (\text{tiré de I})$$

- Une équation traceur :

$$L^{15} + Q_o^{15} = Q_p^{15} \quad (\text{tiré de II})$$

dans ce dernier cas, l'application numérique donne :

$$L^{15} + 1,98 = 3,10$$

soit $L^{15} = 1,12 \text{ kg }^{15}\text{N/ha.}$

Cette quantité, L^{15} , d'azote 15 représente l'azote 15 minéral qui est effectivement lixivié.

Celle-ci correspond à 41 % ($1,12/2,71$) de la quantité d'azote nitrique présent, dans la couche 0 - 60 cm, à la récolte. Le reste de l'azote qui quitte le compartiment minéral a été soit dénitrifié, soit réorganisé.

On peut désormais résoudre l'équation matière où L quantité d'azote total minéral effectivement lixivié, est égale à 41 % de la quantité d'azote minéral présent dans le sol à la récolte (106 kg N/ha. - tableau III-II-1 en annexe).

$$L = 106 \times 41 \% = 43 \text{ kg N/ha}$$

Ainsi on a :

$$43 + Q_o = 71 \text{ kg N/ha (tableau III-II-5 en annexe)}$$

$$\Rightarrow Q_o = 28 \text{ kg N/ha (} Q_o \text{ azote. organique participant aux pertes)}$$

or $Q_o^{15}\text{N} = 1,98 \text{ kg }^{15}\text{N/ha.}$

donc

$E_o = \frac{Q_o^{15}\text{N}}{Q_o} = 7,10\%$

Il s'agirait d'une fraction azotée dont l'excès est proche de celui de l'azote racinaire.

Durant la période hivernale, 38 % de l'azote minéral recueilli dans les percolats est d'origine racinaire. Cette quantité correspond au 2/3 de l'azote racinaire présent dans le sol à la récolte. Ces racines se seraient minéralisées durant les deux mois suivant la récolte.

CONCLUSIONS

La confrontation des résultats obtenus à partir d'essais au champ, nous a permis de quantifier, sur un cycle annuel d'une culture de maïs, les transferts d'azote dans le système sol-plante.

Ainsi, 55 % de l'azote apporté (nitrate de calcium) a été exporté au niveau des parties aériennes. Plus de la moitié de ces exportations se localise dans les grains qui ont utilisé 32 % de l'azote du fertilisant. Ces valeurs sont voisines de celles mesurées à l'issue de cultures de maïs effectuées sur des sols analogues au nôtre, par GUIRAUD (1984) et PAPANICOLAOU et al (1983, 1985) qui ont trouvé respectivement des coefficients réels d'utilisation de 45 % et de 58 %.

Le reste de l'azote apporté (45 %) se répartit de la façon suivante :

15 % dans l'azote minéral présent dans le sol à la récolte.

15 % a été organisé par la voie microbienne.

15 % a été organisé par la voie racinaire.

Au cours de la culture, les pertes par lixiviation ne se sont produites qu'aux dépens du reliquat azoté (77 kg N/ha.).

A ces pertes par lixiviation, d'azote endogène, il convient d'ajouter l'azote exporté au niveau des parties aériennes, soit 205 kg N/ha.. Le stock d'azote du sol perd donc, durant la culture, 282 kg N/ha.. A ce déficit, il faut soustraire l'azote de l'engrais restant dans le sol (75 kg N/ha.) : la culture se solde donc par une perte de 217 kg/ha. d'azote endogène. Nous avons donc constaté, que comme lors de la culture effectuée en chambre de végétation (HETIER et al 1980), qu'une culture au champ se traduit par une perte d'azote du sol difficilement compensable par une restitution de cannes, qui dans notre cas apporteraient 110 kg N/ha..

De plus, au cours de cette culture, le suivi de cinétique de minéralisation-organisation ne nous a pas permis de démontrer l'existence de la « phase active » décrite par de nombreux auteurs (REID et al 1969, FRENEY et al 1969 et EL-HARRIS et al 1983). Ces éventuels cycles doivent avoir une durée, soit très courte, soit supérieure aux cent jours de la culture. De toute manière, les phénomènes observés peuvent s'expliquer par le seul jeu du lessivage et des remontées de la nappe chargée de nitrate.

Le suivi, après la récolte, de l'évolution du système sol, nous a montré qu'aux 217 kg N/ha. perdus au jour de la récolte, il fallait ajouter les 98 kg N/ha. lixivié durant l'hiver. Ce qui porte le déficit à 315 kg N/ha. Nous avons établi que ces pertes se faisaient aux dépens des racines les plus fines, dont environ 64 % se minéralisent durant les 6 mois suivant la récolte. Elles représentent donc le compartiment azoté du système sol-plante qui possède le Temps Moyen de Résidence le plus court (ce terme n'est pas employé ici dans toute son acception).

Pour diminuer ce déficit, il serait inutile d'augmenter les apports. En effet, nous avons trouvé des reliquats importants au moment du semis, ce qui indique que des apports azotés importants ne favorisent pas l'organisation, seul phénomène susceptible d'améliorer le statut organique du sol. Nous pensons par contre, que cette amélioration serait peut-être atteinte par une culture d'hiver.

IV PARTIE

EXPERIENCES DE LABORATOIRE :

DEVENIR DU CARBONE ET DE L'AZOTE RACINAIRE

INTRODUCTION

Comme nous l'avons montré dans le paragraphe précédent, la quantité d'azote organisée, au cours d'une culture au champ, par la voie racinaire est au moins égale à celle organisée par la voie microbienne, et correspond à 15 % de l'azote apporté.

On peut s'interroger sur la stabilité de cette organisation racinaire vis-à-vis du maintien du statut organique des sols.

Ainsi, nous avons montré, qu'après la récolte et en maintenant le sol nu durant l'hiver, que 64 % de cet azote racinaire est, après minéralisation, entraîné hors du profil par les eaux de drainage.

Nous allons dès lors, étudier la stabilité de ces résidus placés dans les conditions contrôlées d'une incubation et d'une culture.

La cinétique de dégradation de résidus végétaux a fait l'objet de nombreuses études tant sur le plan de la biomasse et de leur minéralisation, que sur l'incorporation des composés aux complexes argilo-humiques des sols. Dans certaines d'entre elles, les auteurs ont étudié à l'aide de traceurs, selon le type de résidus, soit des parties aériennes (CERRI et JENKINSON 1981) où des racines de blé (MARTENS 1985) marquées au ^{14}C , soit du matériel doublement marqué (^{14}C , ^{15}N) (LADD et al 1981), le niveau de biomasse et l'incorporation de ces composés marqués dans la matière organique des sols.

Contrairement aux études portant sur la décomposition des résidus de récolte et leur contribution à l'élaboration d'un nouveau végétal (GUIRAUD et al 1980, FELLER et al 1981, PICHOT et EGOUMMENIDES 1981), celles sur les racines enfouies représentent encore un domaine peu étudié.

Dans notre étude, nous avons employé un matériau doublement marqué (^{14}C , ^{15}N) : matière organique du sol et racines. Nous avons donc limité nos mesures à l'estimation des quantités d'azote et de carbone minéralisées durant l'incubation. De plus, une fumigation au chloroforme nous a permis de calculer la biomasse C et N.

CHAPITRE I - ORIGINE ET CARACTERISTIQUES DES SOLS UTILISES

Une culture de maïs, effectuée en chambre de végétation, dont le protocole est présenté dans l'annexe M₂, a permis d'obtenir deux colonnes de sol brun acide (N^o 4 et 5) traitées de façon identique.

A l'aide d'échantillons représentatifs du sol de la colonne 4, les auteurs (HETIER et al 1980) ont dressé le bilan de la culture, qui sera brièvement présenté dans le premier paragraphe.

Le reste du sol de cette colonne, ainsi que la totalité du système sol-racines de la colonne 5, ont été placés en chambre froide.

Les caractéristiques des sols de ces deux colonnes, après leur conservation, seront présentées dans un deuxième paragraphe.

I.1. Bilan de la culture (colonne 4) effectuée en conditions contrôlées

A la suite de cette culture, effectuée en conditions contrôlées, la fertilisation azotée apportée de façon fractionnée (17 fois) a été utilisée à 80 %. Nous constatons (au Tableau N^o IV.I.1 en annexe) que le système sol-racines contient 3,6 µg/g de ¹⁵N, dont 60 % se localisent au niveau des racines. Le reste de l'azote ¹⁵ se trouve dans le sol, dont l'excès isotopique global est de 0,09 %.

Cette culture s'est soldée par une perte de 42,60 mg N/kg de sol (soit 128 kg N/ha.) aux dépens de l'azote du sol.

I.2. Répartition de l'azote et du carbone dans le sol, à la suite de la période de conservation

I.2.1. Le sol de la colonne 5 (tableau IV-I-2 en annexe)

Ce sol a été utilisé lors des incubations et des cultures (de maïs et de ray-grass) effectuées au laboratoire.

Après 58 mois de conservation à 4 °C, l'ensemble de la colonne de sol, contenant les racines a été replacé à la température ambiante. Le système sol-racines est apparu très humide. Après avoir débité la colonne en tranches, l'ensemble a été homogénéisé. Les analyses ont été effectuées sur 10 échantillons de 50 grammes.

Après cette période de conservation, il ne reste plus que 2,26 p.p.m. de ¹⁵N dans l'ensemble du système sol-racines, dont 1/3 dans les racines (avec un excès de 6,64 %). L'azote du sol possède un excès global de 0,06 % de la même façon, la R.A.S. du carbone racinaire est de 1636 kBq/g de C, alors qu'elle était, à la récolte, de 2330 kBq/g de C.

Si nous comparons les résultats en fin de culture (Tableau IV.1.1. en annexe) et après la période de conservation (Tableau IV.1.2. en annexe), on observe une nette évolution et des pertes importantes de C et N d'une part et l'apparition d'azote minéral sous forme nitrique (75 mg avec E % = 0,42) (Tableau n° 16).

TABLEAU N° 16 : PERTES DE C ET N AU COURS DE LA PERIODE DE CONSERVATION DE LA COLONNE N°5
(résultats exprimés pour 1000 g de sol sec)

	AZOTE		CARBONE	
	QN (mg)	Q ¹⁵ N (µg)	QC (mg)	ΔQ ¹⁴ C kg Bq
Racines	- 6,10	- 1237	- 480,00	- 1345
Débris	- 7,00	- 269	- 210,00	- 120,00
N minéral	- 75,00	- 315	/	/
Sol seul	- 56,00	- 457	n.d.	n.d.

Si nous estimons, d'une part que le sol de la colonne 4 est représentatif de celui de la colonne 5, et d'autre part que l'azote minéral formé est représentatif de ce qui a été perdu (sans doute par dénitrification), nous pouvons calculer les quantités d'azote q_s et q_r respectivement fournies par le sol et les racines. Nous posons, en faisant une interpolation linéaire entre l'excès initial et final, les équations suivantes :

* EQUATION MATIERE :

$$q_s + q_r = 75 \text{ mg}$$

* EQUATION TRACEUR :

$$q_s \frac{(E_i \% + E_f \%)}{2} + q_r \frac{(E_i \% + E_f \%)}{2} = 75 \times 0,42 \%$$

Nous avons appliqué, en nous inspirant des travaux de GUIRAUD (1984), à chacune de ces deux fractions, une valeur d'excès résultant d'une interpolation linéaire entre l'excès avant la période de conservation (E_i %) et l'excès après cette période (E_f %).

Nous avons pour le sol :

* E % de l'azote du sol avant la période de conservation : $E_i \% = 0,09$. (annexe IV-I-1)

* E % de l'azote du sol après la période de conservation : $E_f \% = 0,064$ (annexe IV-I-2)

pour les racines :

* E % de l'azote des racines avant la période de conservation : $E_i \% = 11,20$. (annexe IV-I-1)

* E % de l'azote des racines après la période de conservation : $E_f \% = 6,64$. (annexe IV-I-2)

* APPLICATION NUMERIQUE :

$$q_s \left(\frac{0,09 \% + 0,06 \%}{2} \right) + q_r \left(\frac{11,20 \% + 6,64 \%}{2} \right) = 75 \times 0,42 \%$$

* RESULTATS :

$$q_s = 72,10 \text{ mg N}$$

$$q_r = 2,90 \text{ mg N}$$

Ces quantités représentent respectivement 4 % et 15 % des quantités présentes avant la conservation.

Un tel calcul indique que, durant cette période de conservation, l'azote des racines se décompose, 3 à 4 fois plus vite que l'azote du sol, ceci en admettant un marquage homogène pour l'azote des racines et du sol.

I.2.2. Le sol de la colonne 4

L'horizon 0-20 cm du sol de cette colonne a été totalement utilisé lors des analyses effectuées à la récolte. Le bilan établi (Tableau IV.1.3. en annexe) est donc déficitaire en azote 15 par rapport à celui de la colonne n° 5.

Après la conservation, l'ensemble du système sol-racines contient 1,77 p.p.m. d'azote 15 dont 30 % se localisent au niveau des racines. Cet azote racinaire possède un excès de 12,30 %, soit une valeur proche de celle mesurée lors de la récolte (excès global de 11,20 %). Le carbone de ces racines a une Radioactivité spécifique (R.A.S.) voisine de celle mesurée avant la conservation (respectivement, 2845 kBq/gC et 2330 kBq/gC).

La période passée en chambre froide, qui s'est déroulée dans des conditions plus sèches que pour la colonne n° 5, s'est traduite par une conservation presque parfaite des racines.

Il est apparu néanmoins, au cours de cette conservation, une quantité appréciable d'azote minéral (NH_4^+ : 9,7 p.p.m. et NO_3^- : 20,70 p.p.m.) dont l'excès (respectivement 1,23 % et 1,32 %) est supérieur à celui de l'azote du sol (0,085 %). Par ailleurs, la quantité d'azote 15 contenue dans l'ensemble du système sol-racines est, en fin de conservation, de 1,77 p.p.m., soit une quantité très inférieure à celle mesurée avant cette période (3,56 p.p.m.). Il est possible d'expliquer une partie de ce déficit par l'absence de l'horizon 0-20 cm, évoquée précédemment, dans ces résultats.

En vue d'affiner le fractionnement du sol étudié, nous avons pratiqué un tamisage à 200 μm .

La fraction supérieure à 200 μm , très pauvre en azote (0,05 %), possède un excès isotopique (0,14 %) très supérieur à celui de l'azote du sol (0,085 %) (Tableau IV.1.4 annexe).

Il est intéressant de noter la répartition de l'azote dans les deux fractions inférieures et supérieures à 200 μm : la 1^{ère} renferme 9,7 % de l'azote mais 21 % du traceur.

La quantité d'azote nitrique, extraite à l'eau lors du tamisage est proche de celle extraite par KCl ; celle d'azote ammoniacal est un peu inférieure. Il faut remarquer que l'azote organique extrait à l'eau, s'il représente 50 % de la totalité de l'azote de ces hydrosolubles, possède un excès proche de zéro. Si cet azote organique, contenu dans les hydrosolubles, représente soit des petites molécules, soit des cellules bactériennes, il apparaît étonnant que celles-ci soient pas enrichies en azote 15, mais ceci pouvant peut être s'expliquer par des pertes éventuelles d'azote 15 lors de la minéralisation des hydrosolubles.

Selon le protocole exposé en annexe M₆, une hydrolyse acide a été pratiquée sur la fraction inférieure à 50 μm , après tamisage de la fraction inférieure à 200 μm .

Cette fraction inférieure à 50 μm représente, pondéralement 58 % du sol total et 57 % de l'azote total (Tableau IV.1.5-annexe). L'hydrolyse acide indique que la fraction NSAND (Azote Soluble dans l'Acide Non Distillable) représente 50 % de l'azote total de la fraction. Cette proportion est proche de celle trouvée, lors de l'hydrolyse du sol total, par d'autres auteurs, notamment GUIRAUD (1984). L'excès isotopique de cette fraction, constituée d'acides aminés (STEVENSON 1957, BREMMER 1965), est supérieur à celui de toutes les autres fractions isolées.

De toutes façons, toutes les valeurs d'excès isotopiques sont très basses par rapport aux excès isotopiques de l'azote de la plante et de l'azote minéral. Cette méthode ne donne pas sélectivement accès à des fractions très récemment formées.

CHAPITRE II - ETUDE EXPERIMENTALE DE LA MINERALISATION DES COMPOSES CARBONES ET AZOTES

INTRODUCTION

La biomasse microbienne contrôle à la fois les flux de carbone et les processus biologiques des cycles biogéochimiques des éléments nutritifs dans les systèmes sol-plante. Elle représente d'une part, au cours de sa croissance, un puits, et d'autre part, lors de la phase de senescence, une source d'éléments nutritifs.

Il existe de nombreuses méthodes pour estimer la taille de ce compartiment réactionnel. Entre celles basées sur des mesures soit respirométriques (ANDERSON et DOMSCH 1978, SMITH et al 1985) soit d'activités enzymatiques (SMITH et PUGH 1976, JENKINSON et LADD 1981) ou micro-calorimétriques (SPARLING, 1981), il apparaît que la technique de fumigation-incubation proposée par JENKINSON (1966) puis reprise et modifiée par JENKINSON et POWLSON (1976) est la plus utilisée dans les études portant sur le sol. La mesure de ce compartiment permet en outre de quantifier les flux de carbone et d'azote pouvant sortir de ce compartiment.

Au cours de l'incubation qui suit la fumigation par des vapeurs de chloroforme, les micro-organismes tués peuvent servir alors de substrat énergétique aux germes restant ou réinoculés. Par conséquent, le carbone et l'azote microbien minéralisés durant l'incubation, peuvent être estimés à partir du CO_2 dégagé et du NH_4^+ produit.

$$\begin{aligned} \text{Biomasse} &= (\text{Flush de minéralisation})/K \\ &= \frac{F_c}{K} \end{aligned} \quad (I)$$

Le coefficient K représente la proportion de la biomasse microbienne, tuée par les vapeurs de chloroforme, effectivement minéralisée durant l'incubation. Son estimation est réalisée en mesurant la quantité de traceur (^{14}C , ^{15}N), préalablement introduite (sous forme d'un substrat énergétique ou sous forme de micro-organismes marqués) dans le sol non marqué, qui est minéralisée durant l'incubation.

JENKINSON (1966) a estimé les coefficients K_C et K_N respectivement égaux à 0,50 et 0,45 à 0,49. ADAMS et LAUGHLIN (1981) leur ont attribué les valeurs de 0,55 et 0,32. NICOLARDOT (1983) a montré, en utilisant des micro-organismes doublement marqués, que ces coefficients étaient fonction à la fois du type de sol et du type de micro-organismes, et les a estimé respectivement égaux à des valeurs allant de 0,3 à 0,5 et de 0,29 à 0,42.

En ce qui nous concerne, la matière organique du sol utilisé étant elle aussi marquée, il ne nous a pas été possible de déterminer ces coefficients. Cependant, nos incubations ayant été réalisées sur le même sol, l'expression de la biomasse microbienne au coefficient K près ne modifiera donc pas l'interprétation des résultats.

L'estimation du «flush» de CO_2 , représentant la proportion de CO_2 dégagé, due à la minéralisation de la biomasse, a tout d'abord été calculée par différence entre la quantité dégagée par le sol fumigé et le témoin (JENKINSON 1966). Un tel calcul repose sur l'hypothèse d'un taux de minéralisation identique de la matière organique de sol fumigé et du témoin. Cependant, SORENSEN (1975) a montré qu'une telle hypothèse était difficilement admissible. Les chercheurs ont donc été conduits à n'utiliser dans leur calcul, que le flush de minéralisation du sol fumigé (VORONEY et PAUL 1983). Dans notre cas, nous avons employé la méthode de calcul proposée par CHAUSSOD et NICOLARDOT (1983), et décrite ici :

Flush de minéralisation = (quantité minéralisée entre 0 et 7 jours par le sol fumigé) -
(quantité minéralisée entre 7 et 14 jours par le sol fumigé)

$$F_c = F(0-7) - F(7-14) \quad (\text{II})$$

Avant d'appliquer cette méthode, nous avons placé nos sols à 28°C durant 24 jours (15 jours pour le sol de la colonne N° 5) (cette préincubation est notée - 24 jours/0 jour, dans les tableaux en annexe). Ce pré-traitement a pour but d'éviter l'apparition de phénomènes parasites (JENKINSON et POWLSON 1976 b). En effet, l'estimation de la biomasse microbienne, à l'aide de la technique de fumigation au chloroforme, appliquée immédiatement après avoir enrichi des échantillons de sol en matière organique fraîche, aboutit à des résultats sous-estimés (SPARLING et al 1981).

Nous avons appliqué cette méthode sur des échantillons de sol débarassés ou non de leur litière racinaire et à la fraction inférieure à $200\mu\text{m}$. Nous pouvons tenter de mesurer le rôle respectif du sol et des racines dans la constitution de la biomasse microbienne, et suivre l'évolution de ces racines au cours d'une incubation.

Nous allons, dans un premier temps, examiner les résultats obtenus au cours de l'incubation du système sol-racines de la colonne N° 5 ; ceux issus de l'incubation de la colonne 4 seront présentés dans le paragraphe suivant.

II.1. Evolution du matériel de la colonne N° 5

Nous traiterons séparément les résultats carbone et azote

II.1.1. Avec et sans culture

a) CO_2 dégagé

Ce sol a été utilisé par ailleurs pour la culture de maïs en serre, nous avons jugé opportun de présenter ici les résultats concernant le C- CO_2 dégagé lors de cette culture (Tableau IV.II.1). Ainsi, nous pourrions le comparer à celui obtenu au cours de l'incubation Figure N° 9 (les chiffres concernant l'incubation sont donnés au Tableau IV.II.2).

Voir Figure N° 9 page suivante.

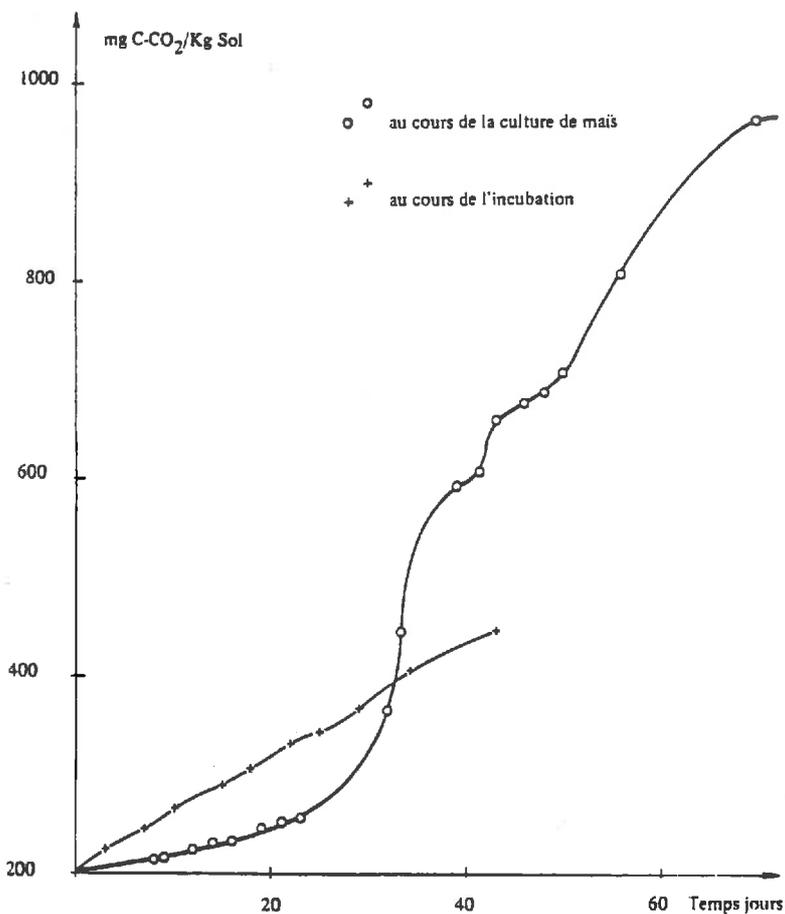


Figure N° 9 : Par le sol de la colonne 5 (avec Racines)
mg C-CO₂ = f (t)

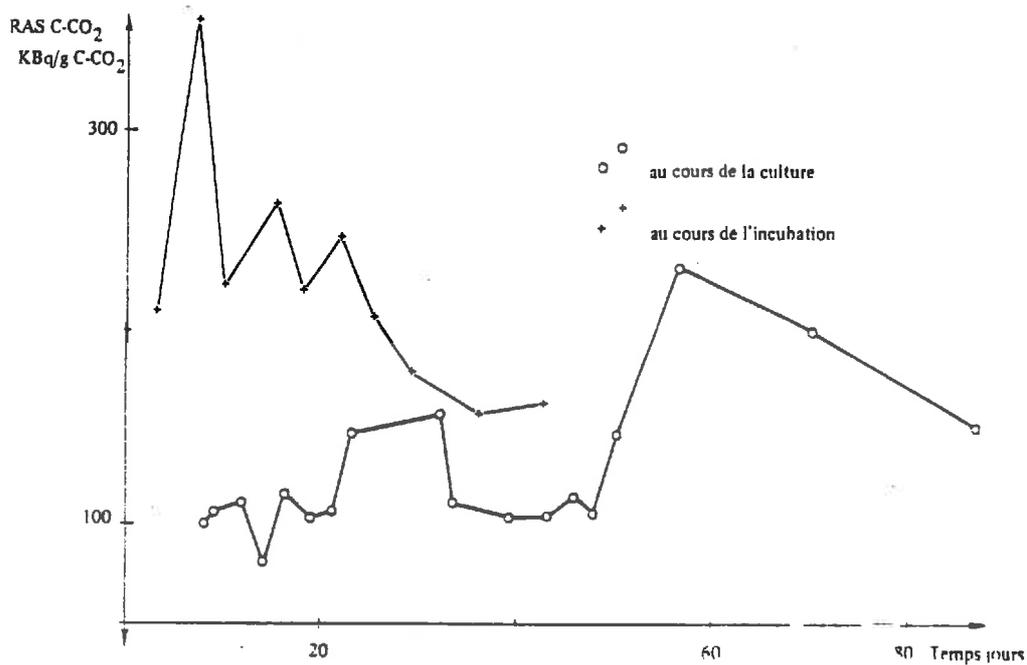


Figure N° 10 : Pour le sol (avec Racine) colonne 5
RAS C-CO₂ = f (t)

La Figure N° 9, où sont portées à la fois les quantités de C-CO₂ dégagées au cours de l'incubation et celles respirées lors de la culture, montre que, jusqu'au 30^{ème} jour, la quantité produite durant l'incubation est supérieure à celle respirée par le sol cultivé. Puis, après cette période, la tendance s'inverse, et le sol cultivé respire plus de C-CO₂. Il faut noter que la température d'incubation (28 °C) est différente de celle de la culture (23 °C); cette différence ne peut être responsable de l'augmentation du C-CO₂ dégagé au cours de l'incubation. En effet, un accroissement de 10° C de cette température peut multiplier par deux la quantité de C-CO₂ respirée.

La culture, et plus particulièrement la présence de racines en cours de croissance, exerce donc un effet dépressif sur le mécanisme responsable de la minéralisation du carbone organique. Pour certains auteurs (FUHR and SAUERBECK 1968, SHIELDS and PAUL 1973, JENKINSON 1977) l'action protectrice de la culture, vis-à-vis de ces mécanismes, est due à une dessiccation du sol, entraînant une baisse de l'activité microbienne. Si pour ces auteurs, le rôle de la culture se limite à une action indirecte, d'autres chercheurs ont montré que les racines en cours de croissance ont une action beaucoup plus directe sur les phénomènes de dégradation.

Ainsi BILLES et BOTTNER (1981) et BOTTNER et al (1984) ont montré, en utilisant du matériel végétal marqué au ¹⁴C, que la culture entraîne simultanément une diminution de la quantité de C-CO₂ dégagé, donc une baisse de l'activité minéralisatrice, et une augmentation de la quantité de ¹⁴C incorporée dans la fraction humifiée de la matière organique du sol (fraction isolée par la méthode de PERSON (1968) qui utilise des paliers d'hydrolyse acide). De plus, ces auteurs ont noté la présence de ¹⁴C dans les racines. Cette constatation a été faite par d'autres chercheurs (RIED et GOSS 1982 ; SPARLING and al 1982); ces derniers attribuent 60 % de la baisse de la quantité de C-CO₂ dégagé sous culture, au prélèvement de molécules carbonées : 40 % d'entre elles entrent, selon ces mêmes auteurs, dans la constitution des structures racinaires et ne sont donc pas transportées vers les parties aériennes.

Dans un premier temps, il ne nous est pas possible d'aller plus loin dans ces conclusions. Nous reviendrons sur ces résultats lors de l'analyse de la culture de maïs en serre (Chapitre III).

b) ¹⁴CO₂ dégagé

Sur la Figure N° 10, où sont portées les valeurs de Radioactivité spécifique (R.A.S.) du C-CO₂ dégagé lors de l'incubation et de la culture, nous constatons que, jusqu'au 40^{ème} jour, la R.A.S. du C-CO₂ respirée lors de l'incubation est supérieure à celle du C-CO₂ dégagée sous culture. Ensuite, le phénomène s'inverse. Cela semble indiquer que la microflore du sol consomme, dans un premier temps, préférentiellement le carbone exsudé par les racines en cours de croissance. Puis, il y a une activation de la minéralisation du matériel humifié marqué, se traduit par une augmentation, à la fois du volume de CO₂ et de son activité spécifique.

Cette période peut être rapprochée à la phase de senescence des racines qui auraient dans un premier temps concentré à leur périphérie ou dans leurs structures du ^{14}C . Cet apport de matériel (marqué) stimulant l'activité microbienne et entraînant la production d'un flush de C-CO_2 dont la R.A.S. est de l'ordre de 200 kBq/g de C-CO_2 .

II.1.2. Estimation de la biomasse microbienne

Nous avons réalisé, après fumigation au chloroforme, une estimation de la Biomasse microbienne C en appliquant la méthode de calcul :

$$(I) \quad \Longrightarrow \quad \text{Biomasse} = \frac{F_c}{K}$$

L'estimation a été faite au coefficient K près, avec le flush de minéralisation défini de la façon suivante :

$$(II) \quad \Longrightarrow \quad \text{Biomasse C au K près} = F(0-7) - F(7-14)$$

L'application numérique à l'aide des chiffres du Tableau IV.II.2 en annexe donne :

$$\text{Biomasse C au K près} = (191,70 - 91,90) - (233,32 - 191,70) = 58,20 \text{ mg C/kg de sol}$$

De la même façon pour le ^{14}C :

$$\text{Biomasse } ^{14}\text{C (en d.p.m.)} = (3078932 - 1422732) - (3548932 - 3078932) = 1186200$$

soit :

$$\text{Biomasse } ^{14}\text{C (kBq)} = 19,770$$

$$\text{et R.A.S. de la Biomasse} = 19,770/58,20 \times 10^{-3} \text{ g} = 339,70 \text{ kBq/g de C microbien}$$

Cette valeur de R.A.S. est supérieure à celle du carbone global du sol (42 kBq/g de carbone du sol).

Nous avons défini, pour le carbone, un indice I_c de la façon suivante :

$$I_c = \frac{\text{R.A.S. du C-CO}_2 \text{ respiré}}{\text{R.A.S. du C global de la fraction incubée}} \times 100$$

Application numérique

TABLEAU N° 17 : CALCUL DES INDICES I_C SOL COLONNE N° 5
(sol contenant les racines)

Temps	3	7	10	15	15 - 3	15 - 7	15 - 10	15 - 14	15 - 21	15 - 28
Incubation										
- C-CO ₂	500 %	850 %	530 %	620 %	530 %	590 %	500 %	430 %	380 %	390 %
Fumigation										
- C-CO ₂	500 %	850 %	530 %	620 %	740 %	500 %	460 %	440 %	390 %	750 %

De telles valeurs, supérieures à 100 %, traduisent l'existence de constituants carbonés plus marqués que le carbone du sol global (contenant les racines). Le système sol-racines n'est donc pas marqué de façon homogène. De plus, les éléments de ce pool alimentent préférentiellement l'activité minéralisatrice de la microflore du sol. Avant d'examiner les causes de cette hétérogénéité de marquage, nous allons exposer les résultats concernant l'azote minéralisé durant l'incubation.

II.1.3. Minéralisation de l'azote au cours de l'incubation

Contrairement au carbone minéral (CO_2), qui lors de sa formation quitte pour sa plus grande partie, le système sol-racines, l'azote minéralisé peut subir d'autres transformations : notamment, être immobilisé et entrer dans la composition organique. L'azote dosé à un instant donné, est donc le résultat de ces transformations brutes. (Tableau IV.II.3. en annexe)

Au cours des 52 jours d'incubation, les résultats concernant l'azote minéral contenu dans l'extrait K_2SO_4 , indiquent une légère augmentation de la quantité d'azote nitrique et ammoniacal, ainsi qu'une croissance de la valeur de l'excès isotopique (qui passe de 0,40 % à 0,48 %). Durant les quinze derniers jours de l'incubation, l'azote organique contenu dans cet extrait, dont la nature exacte n'est pas définie, augmente de façon très sensible : 49 mg N/kg de sol à 96,40 mg N/kg de sol. De plus, son excès passe de 0,15 % à 0,27 %.

Après fumigation, nous constatons (Tableau IV.II.3.) un arrêt de la nitrification. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus par d'autres auteurs (KUDEYAROV and JENKINSON 1976, CHAUSSOD et NICOLARDOT 1983, NICOLARDOT 1983). Les germes ammonifiants, responsables de la libération d'une quantité importante d'azote ammoniacal après la fumigation, sont donc moins sensibles aux vapeurs de chloroforme que les nitrifiants. Signalons que même après un traitement fumigation-réinoculation, MARUMOTO et al (1982) ont montré que l'activité nitrifiante ne s'établissait qu'après une période de 14 jours. De plus, nous constatons que l'excès de l'azote ammoniacal, apparu au terme de l'incubation suivant la fumigation, est supérieur à celui libéré lors de l'incubation (respectivement 0,69 % et 0,44 %).

Le calcul de la biomasse microbienne N, établi à partir des quantités d'azote ammoniacal dosées dans le traitement fumigé, donne les résultats suivants :

$$(II) \quad F_N = F_N(0-7) - F_N(7-14)$$

Application numérique :

$$\text{Biomasse N au K près} = (25,68 - 15,33) - (28,37 - 25,68) = 7,66 \text{ mg N Biom./kg de sol (annexe IV-II-3)}$$

$$\text{Biomasse } ^{15}\text{N} = (0,140 - 0,040) - (0,150 - 0,140) = 0,090$$

$$\text{donc excès de la biomasse N : E \%} = \frac{0,090}{7,66} \times 100 = 1,17$$

L'azote de la biomasse microbienne possède donc un excès (1,17 %) supérieur d'une part à celui de l'azote du sol débarrassé des racines et des débris (0,064 %) et d'autre part à l'azote minéral apparu durant la période de conservation (0,42 %). On peut définir, comme pour le carbone, un indice I_N pour l'azote, de la façon suivante :

$$I_N \% = \frac{E \% N^{-NH_4^+} \text{ minéralisé}}{E \% N \text{ global de la fraction incubée}} \cdot 100$$

Nous constatons, au tableau N° 18 (voir page 76), que ces valeurs sont supérieures à 100 %.

Il existe donc, dans ce sol (contenant les racines) un (ou plusieurs) compartiment(s) possédant un temps moyen de résidence (du carbone et/ou de l'azote) inférieur à celui du sol pris dans son ensemble.

Par ailleurs, à la suite d'une séparation granulométrique, nous avons isolé, du sol total, des fractions possédant des caractéristiques (E % et R.A.S.) différentes.

On peut se demander si de telles fractions peuvent être considérées comme «homogènes» par le biais de la technique d'incubation et ainsi, tenter de quantifier la part respective de chacune d'elles dans les phénomènes de minéralisation du sol total.

II.2. Evolution du matériel de la colonne N° 4

Le stockage du matériel de la colonne N° 4 s'est déroulée dans des conditions beaucoup plus sèches que celle de la colonne 5, ce qui s'est traduit par une meilleure conservation de racines.

Nous exposerons, dans un premier paragraphe, les résultats obtenus au cours de l'incubation du sol total (racines comprises), puis ceux du sol débarrassé de ces racines. Un troisième paragraphe traitera de l'incubation de la fraction du sol inférieure à 200 μ m.

II.2.1. Le système sol-racines

a) CO₂ dégagé au cours de l'incubation

Nous constatons, Figure N° 11, que, proportionnellement au carbone présent au départ, la quantité de C-CO₂ dégagé par le sol de la colonne N° 4 est supérieure à celle respirée à partir du sol de la colonne N° 5.

La Figure N° 12, où nous avons placé les valeurs des indices I_C calculées dans le cas du sol N° 5 (Tableau N° 17) et dans celui du sol N° 4 (Tableau IV.II.4.) montre que l'hétérogénéité de marquage de la matière organique carbonée de cette dernière colonne de sol est plus grande que celle de la colonne N° 5. Si la période, passée en chambre froide, s'est soldée par une meilleure conservation du système sol-racines de la colonne N° 4, par contre, les transformations qui ont modifié les caractéristiques de la colonne 5 ont, par ailleurs, entraîné :

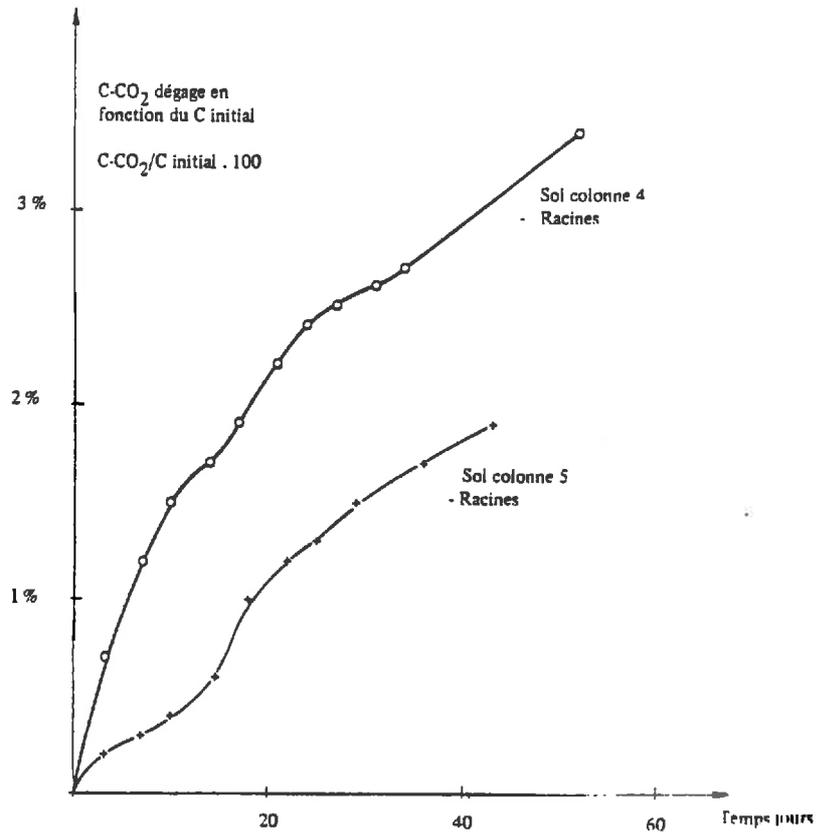


Figure N° 11 : Quantité de C-CO₂ dégagé, rapportée au C initial, au cours du temps (les chiffres sont donnés au T.IV.II.4.)

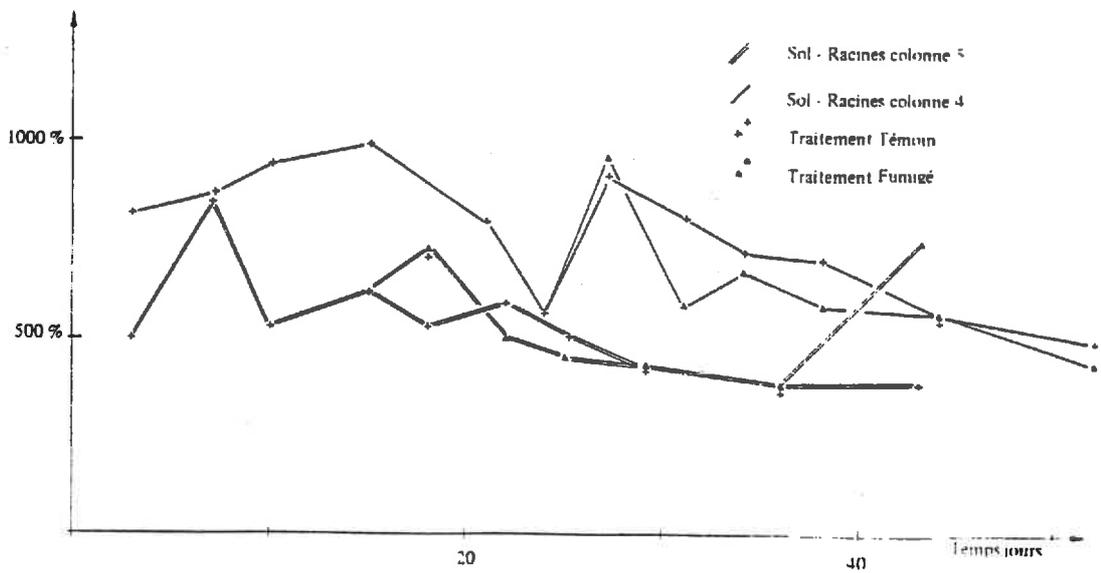


Figure N° 12 : R.A.S. du C-CO₂ dégagé au cours de l'incubation (R.A.S. en % de la R.A.S. initiale)