

Centre ORSTOM de Nouméa
Laboratoire d'Agropédologie

Contrat de Développement
Etat - Province des Iles Loyauté

pour

l'Etude des risques de dégradation de la fertilité
des sols et de pollution des lentilles d'eau douce.

Réunion de présentation des résultats
et de prospective

23 juin 1998

Thierry BECQUER

(1) Etude des risques de dégradation de la fertilité des sols et de pollution des lentilles d'eau douce.

Contrat de Développement

Etat - Province des Iles Loyauté

pour

l'Etude des risques de dégradation de la fertilité des sols et de pollution des lentilles d'eau douce.

Je tiens à vous remercier tous pour votre présence, qui marque l'intérêt que vous portez à nos travaux.

Cette journée a pour objectif de présenter les résultats acquis dans le cadre de la convention entre l'ORSTOM et la Province des Iles qui a pour objectif l'"Etude des risques de dégradation de la fertilité des sols et de pollution des lentilles d'eau douce" à la suite de la mise en place de systèmes de culture intensifiés.

Cette convention est financée dans le cadre des contrats de développement entre la Province des Iles et l'Etat. A cette occasion, je tiens à remercier :

- La Province des Iles, représentée aujourd'hui par le Directeur du Développement et de la Formation, Monsieur Hnepehun,

- ainsi que l'Etat, et en particulier le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, représenté ici par Monsieur Christian Habault, pour le soutien financier qui nous est apporté.

(2) Etude des risques de dégradation de la fertilité des sols et de pollution des lentilles d'eau douce.

Plan :

- Rappel des travaux antérieurs
- Objectifs du programme
- Principaux résultats obtenus
- Objectifs des recherches pour les deux dernières années d'étude
- Perspectives de développement de recherches en agro-pédologie

Divers thèmes seront abordés successivement au cours de cette demi journée :

- Dans un premier temps, nous rappellerons brièvement les travaux antérieurs qui ont conduits à la proposition du programme actuel ;
- Les objectifs poursuivis dans le cadre du programme ;
- Les principaux résultats déjà obtenus (bien que les analyses et l'interprétation des résultats soient encore en cours) ;
- Les objectifs des recherches pour les deux dernières années du programme ;
- Nous terminerons par une discussion plus générale sur les perspectives de développement de recherches en agro-pédologie pour le futur.

(3) Historique

Peu de travaux pédologiques antérieurs :

- Dugain (1953) ; Tercinier (1971)

- Latham et Mercky (1983)

 - ➔ Carte pédologique au 1 : 50 000

 - ➔ Carte d'aptitudes culturales et forestière

Hormis quelques études pédologiques sur la caractérisation des sols des Iles, notamment par Dugain, qui est l'auteur des premières caractérisations de sols sur Maré, et Tercinier, peu de travaux pédologiques avaient été réalisées sur les Iles.

Les premiers travaux importants ont été menés par Marc Latham et Pierre Mercky, au début des années 80 avec la réalisation des cartes pédologiques et des cartes d'aptitudes culturales des îles. Ces cartes restent, aujourd'hui encore, un outil de base pour le développement agricole des Iles Loyauté.

(4) Historique

Peu de travaux agro-pédologiques :

- Travaux sur cocotiers (Bonzon et al., 1989)
- Premier contrat de développement sur "la mise en valeur des sols ferrallitiques allitiques des Iles Loyautés"

Des recherches agropédologiques ont été entreprises par l'ORSTOM à l'initiative de Bernard Bonzon à partir de la fin des années 80. Une première étude sur d'une part, l'adaptation au cocotier des tests de fertilité sur vases de végétation, d'autre part, les facteurs édaphiques limitant la culture du cocotier sur les Loyauté et au Vanuatu a été menée de 1988 à 91 Par Bernard Bonzon et Pascal Podwojewski.

A partir de 1991, les recherches du Laboratoire d'Agropédologie ont portées sur "la mise en valeur des sols ferrallitiques allitiques des Iles Loyautés". Ces recherches ont été menés dans le cadre d'un premier contrat de développement avec la Province des Iles Loyauté.

(5) Historique

Deux axes de recherche :

- **des études pédologiques** visant à caractériser les sols et à préciser leur variabilité ;
- **des études expérimentales en serre** destinées à préciser les carences et les déséquilibres minéraux de ces sols.

Deux axes avaient été suivis :

- **des études pédologiques** visant à caractériser les sols et à préciser leur variabilité. Elles ont montrées :
 - la faible épaisseur des sols et le caractère assez aléatoire qui ne peut pas être déterminé par des observations de surface ; des observations par sondages sont donc nécessaires avant la mise en culture d'une parcelle ;
 - une assez bonne homogénéité physico-chimique avec des différences liées :
 - à la profondeur du sol (les sols superficiels étant généralement plus carbonatés et ayant de ce fait un pH plus élevé) ;
 - à la teneur en carbone qui conditionne la teneur en bases échangeables (Ca, Mg, K) et en P assimilable notamment.
- **des études expérimentales** en serre destinées à préciser les carences et les déséquilibres minéraux de ces sols.

Elles ont montrés que les plantes croissant sur ce sol souffrent de carences minérales très importantes pour la plupart des éléments minéraux (majeurs et oligo-éléments), en raison, notamment :

 - de la pauvreté du sol (K, Si)
 - de la fixation sur les oxydes métalliques du sol (P)
 - de la faible rétention sur le sol (N)

(6) Objectifs du Programme

- Comprendre les conséquences du passage d'une agriculture traditionnelle à une agriculture sédentarisée et plus intensive.

A la suite de ces travaux, nous avons proposé de poursuivre des recherches sur ces sols afin d'analyser les possibilités de développement d'une agriculture plus intensive et d'en évaluer les conséquences sur le sol et sur les eaux.

L'objectif général du programme, comme celui qui conduisait notre réflexion dans le cadre du premier contrat de développement, vise à analyser et à comprendre les conséquences du passage d'un système de culture traditionnel, où la jachère prend une place importante afin de restaurer la fertilité des sols, vers des systèmes intensifiés, plus mécanisés et utilisant plus d'intrants (fertilisants, pesticides, éventuellement eau).

(7) Objectifs du Programme

Deux constats :

- nécessité d'apport de fertilisants dans le cas d'une agriculture sédentarisée;
- faible capacité de rétention des engrais par le sol (sauf P).

En effet, les études antérieures nous ont conduit à faire une double constatation :

- d'une part la **nécessité d'apport de fertilisants**, au moins modérés, dans le cas d'une agriculture sédentarisée ;
- la **faible capacité du sol à retenir les engrais** (hormis le phosphore) du fait de sa profondeur faible, de sa perméabilité importante... d'où les **risques de pollutions des lentilles** d'eau douce

(8) Objectifs du Programme

- mieux connaître les possibilités de développer des productions agricoles (facteurs limitants)
- évaluer les risques sur le sol et sur les eaux ;
- optimiser la gestion des apports (engrais, pesticides).

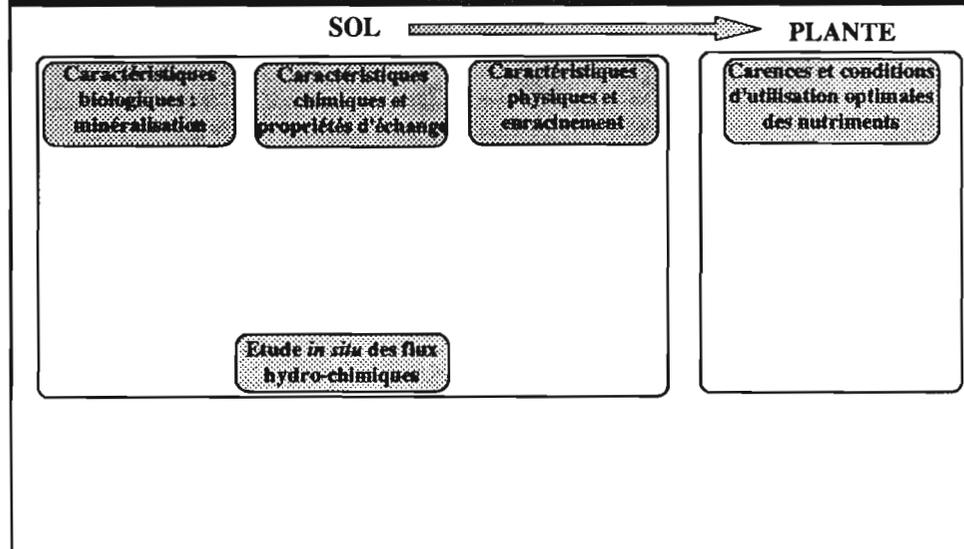
3 objectifs majeurs sont poursuivis :

1) mieux connaître les possibilités de développer des productions agricoles à partir de systèmes intensifiés et, en particulier, de mettre en évidence les **facteurs limitants** physiques ou chimiques ;

2) **évaluer les risques** sur le sol et sur les eaux de ces pratiques ;

3) essayer d'**optimiser la gestion des apports** (engrais, pesticides, eau) en trouvant une bonne adéquation entre les caractéristiques des sols, les pratiques culturales et les possibilités d'assimilation des plantes.

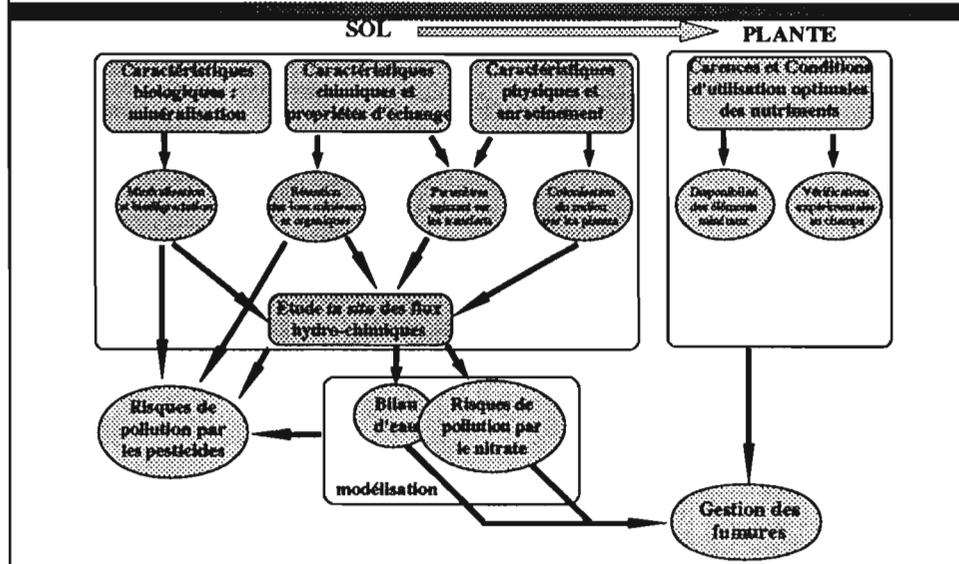
(9) Organisation des recherches



Afin d'essayer de répondre à ces questions, des études sont réalisées en suivant **plusieurs axes** de recherche qui permettent d'analyser les divers compartiments du **système sol - solution du sol - plante**.

- le **premier** correspond essentiellement à des **études** concernant **la plante**. La plante, qui prélève des nutriments à un rythme variable en fonction de sa physiologie et des conditions édaphiques est, en effet, un facteur majeur dans la régulation du cycle biogéochimique des éléments minéraux.
- le second axe concerne l'**étude des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols et leur évolution** à la suite de la mise en culture et des pratiques culturales.
- le troisième axe est la résultante des effets précédents. Il consiste à étudier **sur le terrain les flux hydriques et chimiques**, en particulier à travers l'étude des solutions du sol.

(10) Organisation des recherches



Diverses informations sont attendues de ces recherches :

1) Au niveau du sol, ceci doit nous permettre :

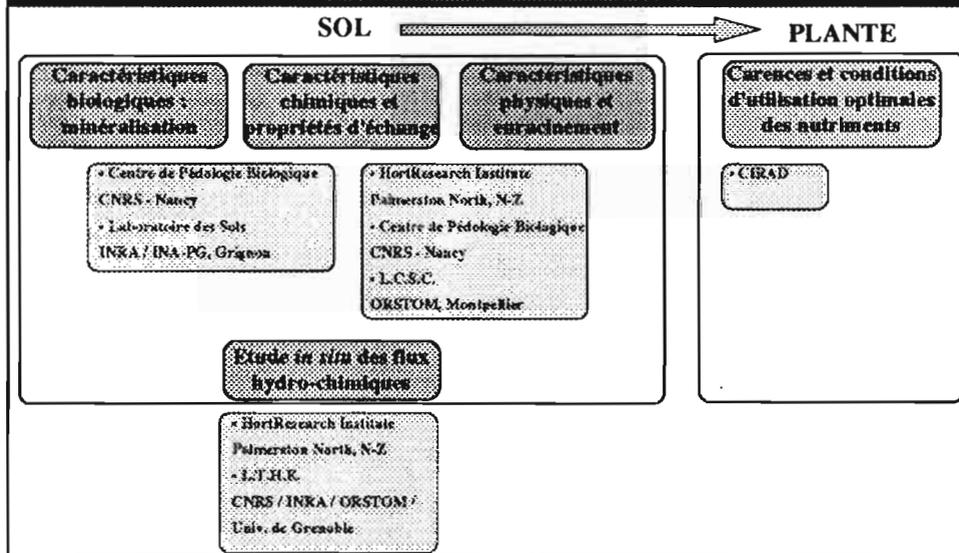
- d'étudier l'incidence de l'activité minéralisatrice du sol sur le devenir de certains composés susceptibles de devenir des sources de pollution. En particulier, le rôle de la minéralisation dans :
 - la **production d'Nmin et de nitrate** ;
 - la **dégradation des pesticides** est très important.
- de déterminer l'incidence des **paramètres agissant sur** :
 - la **rétention** et la **disponibilité des éléments**, que ce soit des composés minéraux tels que le phosphate ou le nitrate ou des composés organiques comme les pesticides
 - ainsi que sur le **transfert de l'eau et des solutés** tels que : la **structure**, la **porosité**, la **perméabilité**...
 - ou les **paramètres agissant sur les possibilités pour les plantes de coloniser le milieu** telle que la **compacité**...

2) Parallèlement à ces études, nous avons réalisé un **suivi au champs des flux d'eau, de nitrate et de potassium** afin de pouvoir **quantifier les transferts** de ces éléments. Nous nous sommes limité à ces éléments qui sont ceux qui sont les plus susceptibles d'être lixiviés à la suite de leur apport par les engrais. Le phosphore est très fortement retenu dans ces sols comme nous le verrons et sa lixiviation est négligeable. En ce qui concerne les pesticides, leur suivi *in situ* est extrêmement difficile à réaliser et n'a donc pas été entrepris.

3) à partir des résultats précédents, nous pouvons :

- déterminer des bilans d'eau
- évaluer les risques de pollution par le nitrate
- modéliser les transferts d'eau et de nitrate afin de permettre une meilleure gestion des fumures
- ces données devraient permettre également de nous aider à estimer les risques de pollution par les pesticides.

(11) Organisation des recherches



Pour réaliser ces recherches, nous avons développés diverses collaborations. Je voudrais citer, en particulier :

- **Le Hort Research Institute** de Palmerston North en Nouvelle-Zélande qui a beaucoup contribué :
 - à la caractérisation des **paramètres agissant sur la rétention et le transfert des solutés** dans le sol
 - et à la **modélisation** des données
- le **Centre de Pédologie Biologique** du CNRS à Nancy qui participe à des travaux :
 - sur la **caractérisation physique** du sol
 - et sur le **devenir des pesticides**.
- Divers Laboratoire de l'ORSTOM, notamment :
 - le Laboratoire d'Etude du Comportement des Sols Cultivés de Montpellier
 - le Laboratoire d'Hydrophysique de Bondyont également contribué à ces travaux.

En ce qui concerne les études concernant la plante nos actions ont été relativement limitées. Nous avons bénéficié des travaux qui ont été entrepris par le **CIRAD** sur le même site d'étude. Je profite de l'occasion pour remercier le CIRAD et tout particulièrement les personnes qui ont travaillé à Maré, pour l'aide qu'ils nous ont apportés lors de la réalisation de ces recherches.

Ces travaux, réalisés sur le site de Taïwanèdre n'ont été possible que grâce à la contribution du GIE CORAWAGUKO. Je voudrais également les remercier pour leur accueil et leur aide.

(12) Organisation des recherches

- Bernard BONZON
- Emmanuel BOURDON
- Céline DUWIG
- Igor DUBUS
- William NIGOTE
- Edouard OUCKEWEN
- Léon TAPUTUARAI
- Thierry BECQUER
- Jean-Louis DUPREY et l'ensemble du personnel du Laboratoire de Chimie.

Outre les diverses collaborations qui ont pu se développer au cours de ce programme, je profite de l'occasion pour vous présenter les membres de l'équipe ORSTOM qui ont contribué à la réalisation de ce programme :

- Bernard BONZON, responsable du Laboratoire d'Agropédologie, qui a initié, en 1990, les travaux que notre Laboratoire mène sur les Iles dans le cadre d'un premier contrat de développement ;
- Emmanuel BOURDON, qui est assistant ingénieur à l'ORSTOM, actuellement en poste à Montpellier ;
- William NIGOTE, Edouard OUCKEWEN et Léon TAPUTUARAI qui sont techniciens à l'ORSTOM-Nouméa ;
- Céline DUWIG, qui est Allocataire de Recherche et qui va soutenir sa thèse le 8 septembre prochain à l'Université de Grenoble. Cette thèse s'intitule "Etude des transferts d'eau et de nitrate dans les sols ferrallitiques de Maré (Nouvelle-Calédonie) : risques de pollution des lentilles d'eau douce.
- Igor DUBUS, qui était Volontaire de l'Aide Technique ;
- et moi même, Thierry BECQUER, qui suis responsable scientifique du programme. Je suis actuellement en poste dans un laboratoire du CNRS, le Centre de Pédologie Biologique, à Nancy.

Aux membres du Laboratoire d'Agropédologie, j'associe toutes les personnes du Laboratoire d'Analyse de Nouméa, notamment Jean-Louis DUPREY, le responsable du Laboratoire. Je tiens à les remercier vivement pour les nombreuses analyses qu'ils ont eu à réaliser pour que nous puissions mener à bien ce programme.

(13) Résultats

- Présentation du site d'étude
- Suivi de l'eau et des transferts de nitrate : évaluation des risques de pollution de la nappe par le nitrate
- Rôle de la minéralisation de l'azote dans la production de nitrate
- Rétention du phosphore et incidence sur sa disponibilité pour les plantes

Dans cette seconde partie de mon exposé, je vais vous présenter quelques résultats obtenus au cours de ce travail.

Tout d'abord, je vais rappeler les principales caractéristiques du sol et présenter le site d'étude et le dispositif expérimental.

Ensuite, je présenterai quelques résultats concernant le suivi des transferts d'eau et de nitrate qui ont été réalisés au cours de 3 saisons des pluies successives (1995, 1996, 1997). Nous aurons alors les premiers éléments d'évaluation des risques de pollution de la nappe par le nitrate.

Je continuerai en présentant les résultats d'une étude visant à évaluer la production de nitrate par le sol lors de la minéralisation de la matière organique du sol. Ceci nous permettra de voir le rôle de la minéralisation de l'azote dans la fourniture d'azote au sol et dans les risques de pollution de la nappe.

Je terminerai par quelques résultats concernant la rétention du phosphore par le sol et son incidence sur sa disponibilité pour les plantes.

(14) Le sol

Caractéristiques :

- faible épaisseur (40 cm) ;
- teneurs en carbone importantes (10-15%) ;
- teneurs en oxydes de Fe et Al très forte

Incidence sur la fertilité :

- faible réserve en eau et drainage rapide ;
- effets sur minéralisation (N ; Pesticides ?) et rétention (P ; Pesticides ?)
- effets sur rétention (N ; P ; Pesticides ?)

Les sols ferrallitiques allitiques (**DIAPO1**), développés au centre des 3 îles Loyauté, principalement à Maré et, dans une moindre mesure, à Lifou sont les seuls susceptibles d'être utilisés dans le cadre d'une agriculture mécanisée. En effet, malgré une épaisseur faible (40 cm environ), ils sont plus profonds que les sols bruns allitiques. Toutefois, le calcaire n'a pas toujours une profondeur homogène (**DIAPO2**), ce qui peut rendre la mécanisation difficile.

Outre sa faible épaisseur, les caractéristiques principales du sol sont :

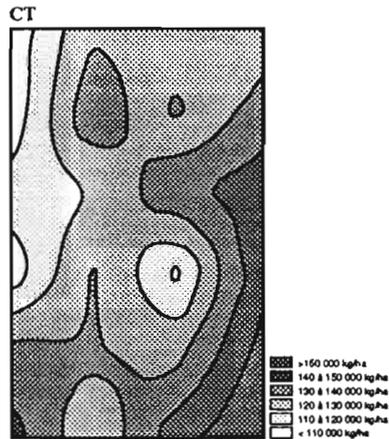
- la teneur très importante en carbone, notamment dans l'horizon de surface.
- la très grande richesse en oxydes de Fe et Al de l'ensemble du profil.

Ces caractéristiques physico-chimiques ont une incidence sur la fertilité du sol :

- la faible épaisseur induit une faible réserve en eau et, par conséquent, un drainage rapide ;
- la teneur en carbone a des effets sur l'activité minéralisatrice du sol et sur la rétention des éléments. Nous en verrons quelques illustrations dans le cas de N et P et j'y reviendrai ensuite en ce qui concerne les pesticides
- les oxydes ont également des effets sur la rétention des ions minéraux et organique comme nous allons le voir également.

(15) La parcelle de Tawainède

- Une variabilité modérée du milieu d'étude



Nous avons caractérisé en détail la parcelle d'essai sur le site de Tawainède.

Les études de variabilité que nous avons réalisées ont montrés une assez bonne homogénéité de la structure et des caractéristiques physico-chimiques.

Il n'en demeure pas moins qu'il existe une certaine variabilité. Par exemple, ici, nous avons représenté le stock total de carbone et on constate qu'il peut varier de 50 % entre le maxima et le minima.

La prise en compte de cette variabilité est difficile, mais elle peut induire quelques divergences dans les résultats obtenus pour divers points d'observation.

(16) Le dispositif expérimental

- Diverses rotations
- 2 types de travail du sol
- 3 niveau de fertilisation

	M1			M2		
	C	D	E	F	G	H
P0						
P6						
P7						
P8						
P9						
P5	C					
P4						
P3	C	D		E	F	
P2	A	B				
P1						

Le dispositif expérimental qui a été mis en place et suivi par le CIRAD a pour objectif de pouvoir analyser les effets sur diverses **rotations** de cultures de 2 niveau d'intensification :

- le type de **travail du sol** avec, d'une part, un travail classique avec labour, d'autre part, un travail minimum du sol

- le niveau de **fertilisation** avec :

F1 = 400 kg / ha / an de 13 13 21

F2 = 800 kg / ha / an de 13 13 21

F3 = F2 + compost

Nous avons suivi plus particulièrement quelques unes de ces parcelles.

(17) Suivi de l'eau et des transferts de nitrates: évaluation des risques de pollution.

- Les dispositifs de suivi
- La détermination des paramètres hydrodynamiques
- Le drainage
- La lixiviation du nitrate et du potassium
- Bilans

Un suivi des transferts d'eau et de solutés, notamment du nitrate, a été réalisé au cours de 3 cycles culturaux successifs pendant les saisons des pluies de 1995, 1996 et 1997.

Ce suivi a nécessité :

- la mise en place de divers dispositifs de suivi ;
- la détermination de divers paramètres, hydrodynamiques surtout, mais également structuraux, culturaux..., qui conditionnent les transferts ;

Je vous présenterai ensuite quelques résultats obtenus lors de ces suivis et les bilans qui ont pu être calculés à partir de ces données.

(18) Les dispositifs de suivi de l'eau

La loi de Darcy :

$$q = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z}$$

- La teneur en eau du sol : la TDR
- La pression de l'eau dans le sol : le tensiomètre
- La conductivité hydraulique

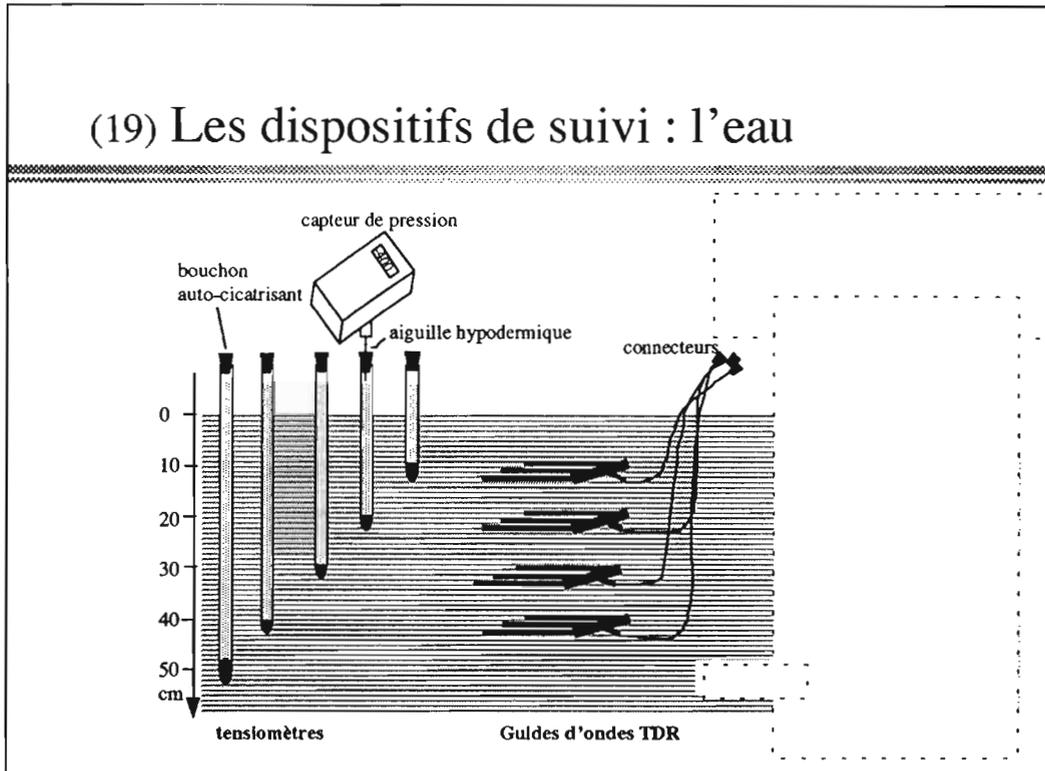
Le drainage est calculé à partir d'une loi générale sur les écoulements dans un milieu poreux : la loi de Darcy. Cette loi indique que le flux d'eau (q) est proportionnel au gradient de charge hydraulique à une profondeur donnée, c'est à dire à la différence de pression de l'eau entre 2 points encadrant cette profondeur, et la conductivité hydraulique du milieu $K()$, elle même fonction de la teneur en eau du milieu.

Nous avons donc besoin de connaître :

- la teneur en eau du sol mesurée par la TDR (Time Domain Reflectometry) ;
- la pression de l'eau à divers niveau qui nous est donnée par des tensiomètres ;
- la loi reliant la conductivité hydraulique à la teneur en eau du sol.

Divers dispositifs ont donc été utilisés pour suivre les teneurs en eau et la pression de l'eau dans le sol.

(19) Les dispositifs de suivi : l'eau



Nous avons donc installés sur chaque parcelles suivies :

- 2 séries de tensiomètres placées à 10, 20, 30, 40, et 50 cm de profondeur. Un tensiomètre est un tube plastique muni d'une céramique poreuse à sa base. Le tensiomètre est rempli d'eau et bouché par un bouchon hermétique à son sommet. Le sol provoque une succion sur la céramique poreuse qui se répercute sur la colonne d'eau. On mesure la dépression exercée par le sol à l'aide d'un capteur de pression.

- 2 séries de sondes TDR placées à 10, 20, 30, et 40 cm de profondeur. La TDR est un appareil qui envoie une onde électro-magnétique dans le sol et qui mesure la vitesse de propagation de cette onde dans le guide d'onde inséré dans le sol. Cette vitesse est fonction de la teneur en eau.

Nous verrons par la suite, la relation entre la teneur en eau et la mesure effectuée par la TDR ainsi que la loi reliant la teneur en eau à la conductivité du sol.

(DIAPOS)

(20) Les dispositifs de suivi : les solutés

- Détermination de la concentration du soluté par :
 - Lysimétrie
 - Bougies poreuses

- Calcul de la lixiviation :

$$L = D \times C$$

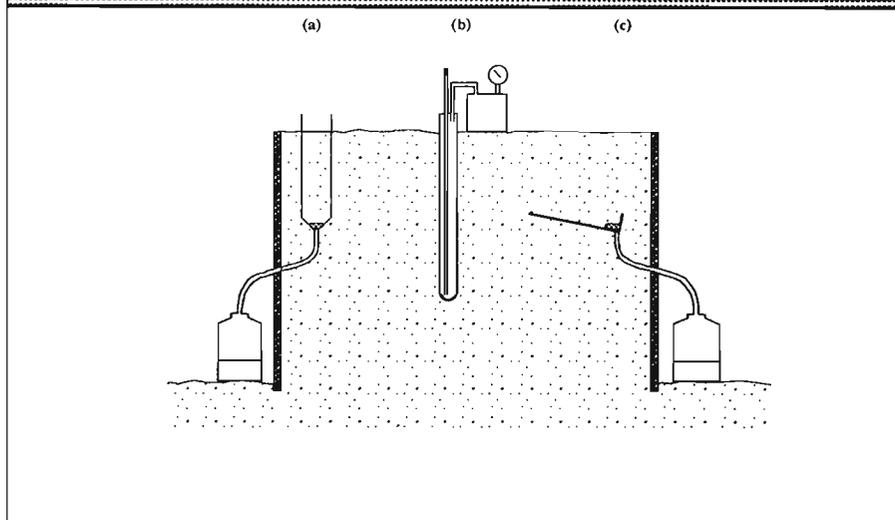
Il existe de nombreuses méthodes pour collecter des solutions du sol et ainsi pouvoir mesurer la concentration d'un soluté. Toutes ont leurs inconvénients et leurs avantages et fonctionnent plus ou moins bien selon les milieux d'étude.

Certaines méthodes classiquement utilisées nécessitent de faire des prélèvements d'échantillons de sol. Ces méthodes ne sont pas adaptées à la réalisation d'un suivi.

Certaines méthodes consistent à mettre en place des dispositifs pérennes permettant de récolter des solutions du sol au champs. Il s'agit des systèmes lysimétriques et des bougies poreuses.

Ensuite, pour calculer la Lixiviation, il faut multiplier la Concentration du soluté par la quantité d'eau drainée sur une période donnée.

(21) Les dispositifs de suivi : les solutés



Nous avons donc tenté d'utiliser divers systèmes de collecte des solutions du sol : des lysimètres et des bougies poreuses.

Les lysimètres sont de deux grands types :

-les plaques lysimétriques : ce sont des plaques d'acier (ou de matériaux plastiques très durs) munies d'un rebord qui sont enfoncées dans le profil de sol. Ces plaques peuvent collecter les solutions qui drainent à travers le sol.

- les tubes lysimétriques : une colonne de sol est isolée du reste du sol. Le fond est muni d'un dispositif de collecte des solutions. Ces tubes doivent être suffisamment grand pour que des plantes puissent être mises dans le tube sinon on modifie considérablement la composition des solutions du sol par rapport au sol sous culture. De plus, l'augmentation de taille des dispositifs minimise les effets de bordure...

Toutefois, l'augmentation de la taille rends la construction des dispositifs très difficile lorsque l'on souhaite avoir des monolithes de sol non perturbés.

Ces deux types de dispositifs permettent de collecter, en principe, l'eau qui s'écoule naturellement par gravité.

Ceci n'a malheureusement pas été le cas. Les lysimètres ont très mal fonctionnés, probablement du fait de la structure très fine du sol. Ils n'ont permis de collecter des solutions qu'en de rares occasions.

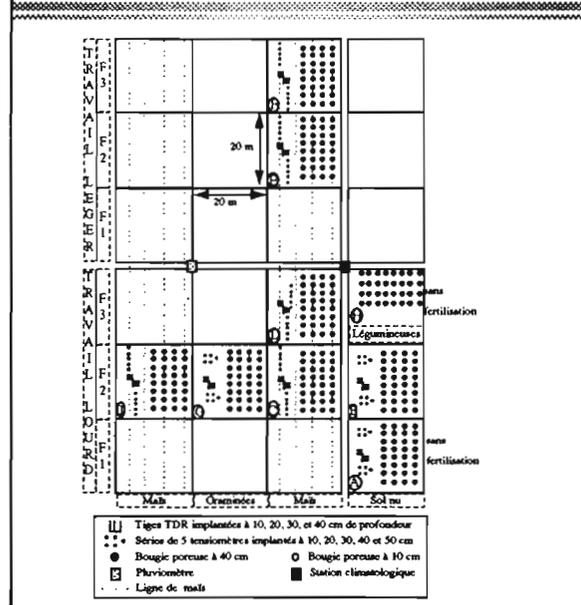
Les bougies poreuses sont constituées d'un tube de PVC muni à sa base d'une céramique poreuse et d'un bouchon à son extrémité supérieure. Une dépression peut être appliquée à l'intérieur de la bougie à l'aide d'une pompe. Cette dépression force l'eau à rentrer dans la bougie. Cette eau pourra ensuite être collectée à l'aide d'un tube capillaire et d'une seringue.

Ce type de dispositif permet de récolter l'eau de gravité et un peu d'eau de rétention (jusqu'à la succion appliquée).

Ces dispositifs nous ont donnés satisfaction et ont été utilisés pour obtenir les résultats que je vais vous présenter.

Auparavant, je vais vous montrer quelques diapositives pour vous présenter les divers dispositifs utilisés. **(DIAPOS)**

(22) Les dispositifs de suivi : les installations de terrain



Divers dispositifs ont donc été installés sur le terrain.

Nous avons installés des équipements de suivi météorologique.

Sur chaque parcelles suivies, nous avons installés :

- 2 séries de 5 tensiomètres placés à 10,20, 30, 40 et 50 cm
- 2 séries de 4 sondes TDR placées à 10,20, 30 et 40 cm
- 8 bougies poreuses placées à 10 cm
- 3 séries de 8 bougies poreuses placées à 40 cm à partir de 1996. En effet, il est déconseillé de prélever de l'eau dans une bougie poreuse à des intervalles de temps trop réduits (5-7 jours) ; du fait des transferts extrêmement rapides, nous avons implantés 3séries de bougies sur lesquelles les prélèvements de solution sont effectués alternativement.

Des lysimètres plaques et tubes ont également été installés sur 3 parcelles maïs n'ont pas donnés satisfaction.

En 1995, nous avons suivi 4 parcelles : B (sol nu), C et I (maïs) et G (graminées), toutes avec même niveau de fertilisation F2 et un travail du sol lourd.

En 1996, 8 parcelles : A (sol nu non fertilisé) ; B (sol nu fertilisé), C et D (maïs, travail lourd) ; E et F (maïs travail léger) ; G (prairie de graminées fertilisées) et H (prairie de légumineuses non fertilisées).

(23) Les paramètres de transfert

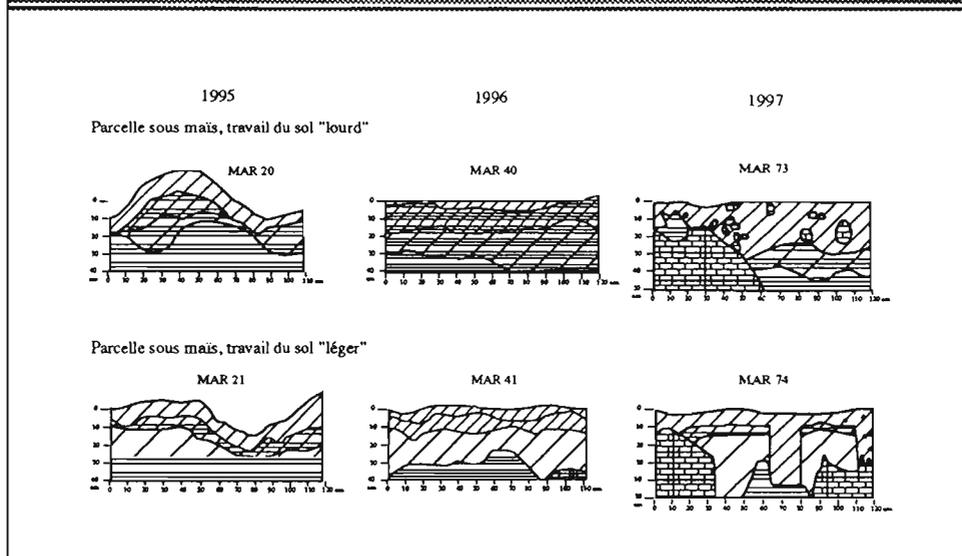
- La conductivité hydraulique
- La calibration de la TDR
- Détermination de la rétention du nitrate

Les transferts de l'eau et des solutés sont régies par divers paramètres qu'il faut déterminer pour les conditions de sol de l'étude.

La prise en compte des systèmes de culture nécessite dans un premier temps de bien décrire le milieu afin de mesurer les paramètres considérés en fonctions des diverses modifications du sol induites par les cultures.

Je vais vous présenter très rapidement quelques travaux illustrant ces points.

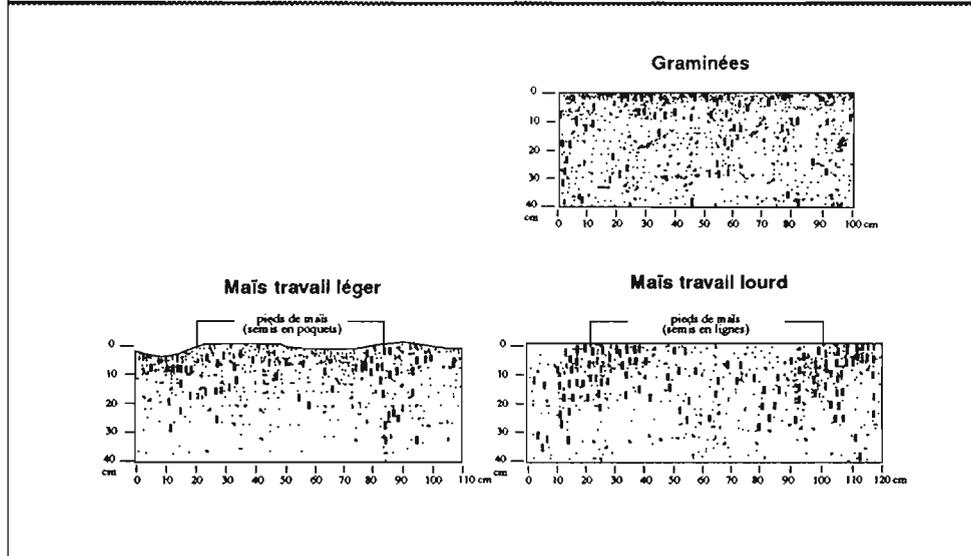
(24) Les paramètres de transfert : la structure du sol



La volonté de bien prendre en compte les systèmes de culture nous a amené :

- d'une part à réaliser des description morphologiques précises des sols afin de faire, lorsque cela était possible, des déterminations des paramètres hydrauliques sur des volumes structuraux bien identifiés.

(25) Les paramètres de transfert : la densité racinaire

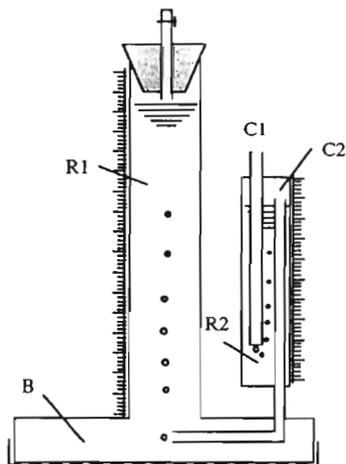


- d'autre part à essayer de quantifier la profondeur d'enracinement et la densité racinaire.

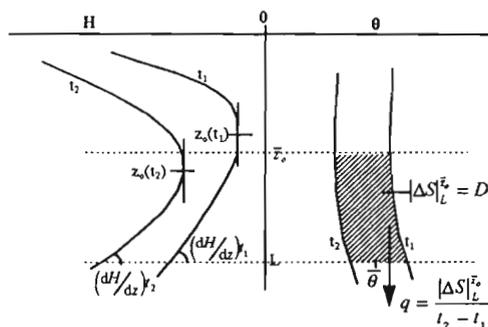
Ces paramètres peuvent en effet expliquer certaines variations observées.

(26) Les paramètres de transfert : la conductivité hydraulique

● L'infiltromètre



● Le plan de flux nul



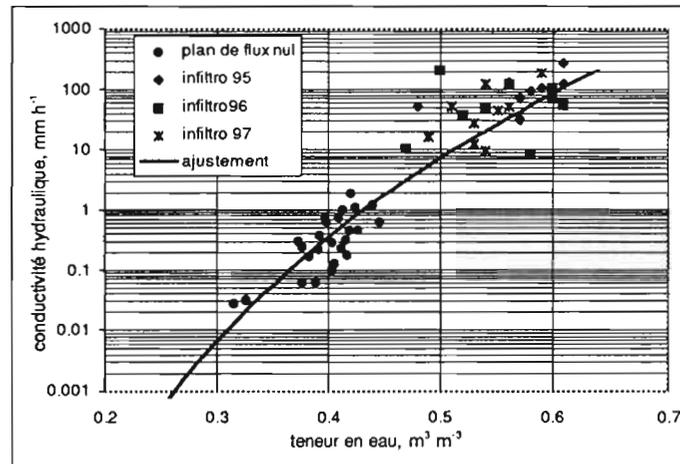
La conductivité hydraulique est une fonction de la teneur en eau comme nous l'avons vu précédemment. Malheureusement, il n'existe pas de méthode de mesure applicable à toute la gamme de variation de la teneur en eau.

Nous avons dû utiliser 2 méthodes complémentaires :

- l'infiltrométrie, qui permet de mesurer la conductivité hydraulique dans des conditions d'humidité proche de la saturation. Cette méthode consiste à imposer une légère succion (0,5 à 15 cm d'eau) à l'infiltromètre et à suivre la quantité d'eau qui percolle à travers la base de l'infiltromètre.

- la méthode du plan de flux nul. Pour des humidités proche de la capacité au champ, il existe parfois dans le sol un point séparant la zone supérieure du sol, qui est soumise à l'évaporation, de la zone profonde, soumise au drainage, où le gradient de charge hydraulique est nul. La variation de stock d'eau, pour 2 dates données, entre ce niveau et le niveau de référence (40 cm pour nous) correspond au drainage.

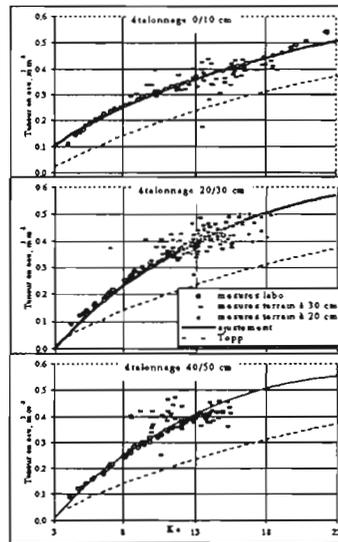
(27) Les paramètres de transfert : la conductivité hydraulique



Ceci nous a permis de déterminer une loi qui relie la conductivité hydraulique à la teneur en eau.

Ce paramètre est très important puisqu'il varie de plus de 100 mm / h à saturation à 0,01 mm / h à 30 % d'humidité.

(28) Les paramètres de transfert : calibration de la TDR



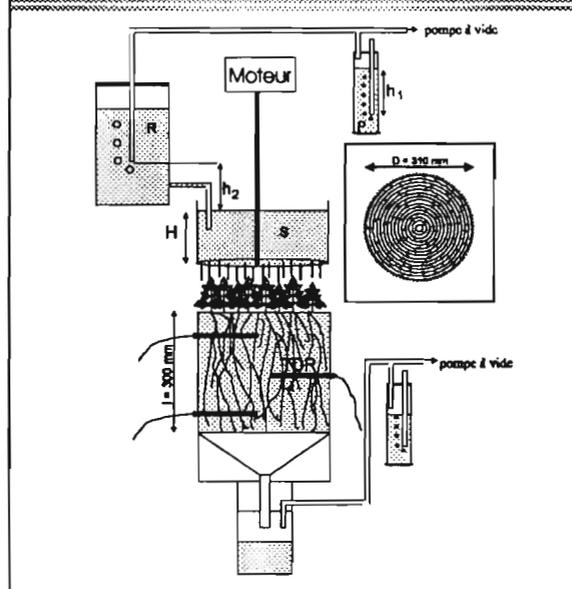
Les mesures réalisées par la TDR ont l'avantage d'être non destructives ; il est ainsi possible de réaliser des mesures successives sans perturbation du milieu, ce qui ne peut évidemment pas être réalisé avec les méthodes gravimétriques classiques. Cependant, la TDR ne permet pas la détermination directe de la teneur en eau du sol. C'est la constante diélectrique du milieu, K_a , qui est mesurée. La relation entre K_a et la teneur en eau varie en fonction des caractéristiques physico-chimiques du milieu. Une relation assez générale avait été proposée pour l'ensemble des sols : la relation de Topp. Elle s'est révélée très mal adaptée à notre sol.

Nous avons donc dû effectuer une calibration à partir :

- de couples de données de terrain où nous avons à la fois des mesures gravimétriques et des mesures TDR ;
- d'une expérimentation au laboratoire sur monolithes de sol non perturbés.

Les résultats nous montrent la divergence entre la relation de Topp et le modèle que nous avons utilisé par la suite.

(29) Les paramètres de transfert : le facteur retard du transfert du nitrate



Un des paramètres majeurs dans le transport des solutés est le facteur retard dû à la rétention éventuelle des ions sur les charges électrostatiques du sol.

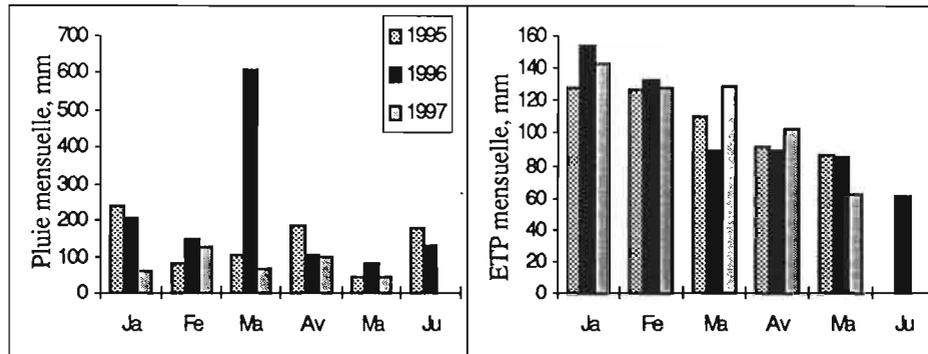
La plupart des sols ont essentiellement des charges électro négatives qui permettent de retenir les cations. Dans les sols oxydiques, comme celui de Maré, les oxydes de Fe et Al développent des charges électro positives susceptibles de retenir éventuellement les anions comme le nitrate.

Nous avons donc essayé de quantifier ce facteur retard lors d'expérimentations réalisées par Céline Duwig à Palmerston North avec des collègues néo-zélandais. Au cours de ces expérimentations, du nitrate a été apporté en surface d'une colonne de sol et son transfert a été suivi grâce à des tiges TDR implantées à divers niveaux et grâce à la collecte des effluents à la base de la colonne.

Nous avons ainsi pu évaluer ce facteur retard qui est de l'ordre de 1,2 à 1,5. Ceci indique que le nitrate est lixivié 1,2 à 1,5 fois moins vite que l'eau qui sert à l'entraîner.

Ce point est important pour réduire un peu la vitesse de lixiviation du nitrate.

(30) Suivi sur le terrain : La pluviométrie et l'ETP



Pour quantifier la drainage et la lixiviation nous avons donc réalisé un suivi de terrain sous diverses parcelles, comme je l'ai indiqué précédemment.

Les données climatologiques mettent en évidence des variations inter-annuelles très importantes :

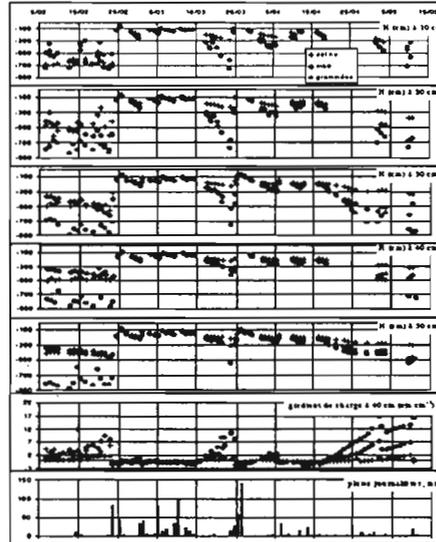
- 1995 était une année assez sèche hormis le mois de janvier avec un épisode pluvieux de 170 mm
- 1996 est une année humide avec un mois de mars très arrosé : 600 mm pour l'ensemble du mois dont 240 mm lors du passage du cyclone Béli.
- 1997 est une année très sèche avec une pluviométrie de seulement 490 mm au cours des 5 premiers mois de l'année.

L'évapotranspiration varie par contre assez peu.

La pluviométrie est évidemment un facteur déterminant sur le drainage et la lixiviation ; ce n'est pas le seul comme nous allons le voir par la suite.

Tout d'abord, à titre d'exemple, je vais vous présenter quelques données obtenues en 1996 sur quelques parcelles.

(31) Suivi sur le terrain : la charge hydraulique

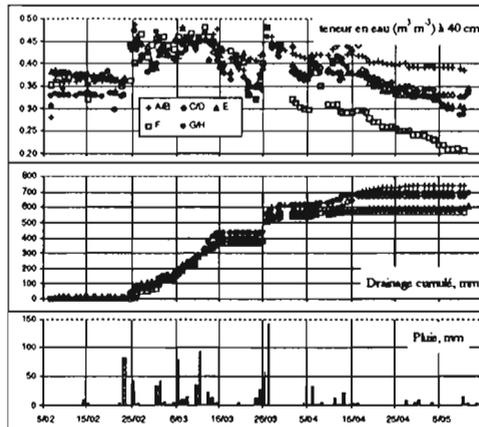


Nous avons donc suivi la charge hydraulique tous les 10 cm. Pour les 3 parcelles présentées ici, nous pouvons observer des différences de charge importantes : les graminées induisent un assèchement nettement plus important du profil de sol que le maïs jusqu'à plus de 40 cm de profondeur.

A partir des charges à 30 et 50 cm, nous avons calculé le gradient de charge à 40 cm. Un gradient négatif indique un drainage alors qu'un gradient positif indique des remontées capillaires.

Un drainage a lieu pendant une bonne partie du cycle de culture, de fin février à mi-avril.

(32) Suivi sur le terrain :
la teneur en eau et le drainage



Les teneurs en eau ont également été suivi journalièrement.

Les teneurs en eau à 40 cm sont présentées ici.

A cette profondeur, il y a peu de divergence de teneurs en eau entre les diverses parcelles cultivées (hormis la parcelle F, sous maïs, pour des raisons que nous n'avons pas identifiées). Seules les parcelles sous sol nu restent plus humides.

A partir de ces données et des données de charge hydraulique et de conductivité hydraulique, nous avons calculé le drainage. Celui-ci est de l'ordre de 400 mm en 3 semaines entre fin février et mi-mars et de 600 à 700 mm sur l'ensemble du cycle de culture de 1996.

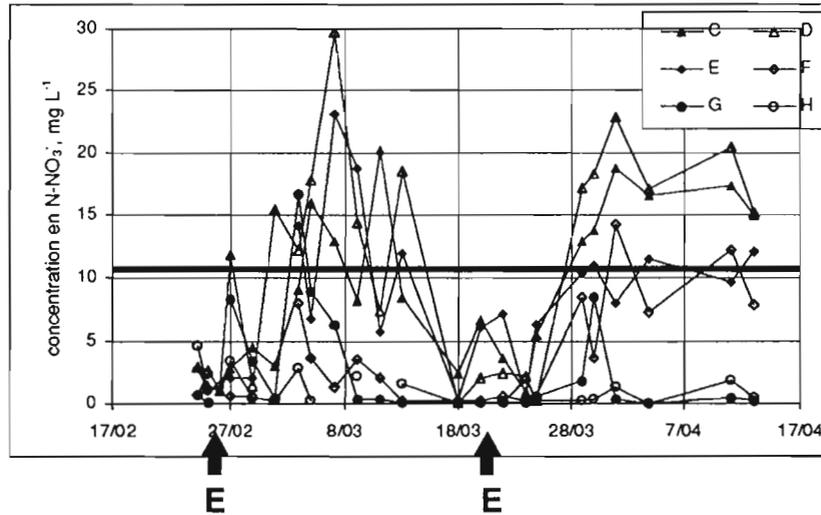
(33) Suivi sur le terrain : Bilans hydriques

Date	Pluie mm	ETP mm	ETR mm	Drainage cumulé mm ΔS_w (fin - début de période) mm						
				A/B	C	D	E	F	G/H	I
20/01-05/05 1995	517	400	173	293	276	-	-	-	281	268
				43	12				7	34
22/02-10/05 1996	868	244	150	653	601	601	538	546	611	-
				20	0	17	-12	-12	6	
5/02-6/05 1997	317	308	192	75	55	62	-	-	71	-
				43	4	0			35	

Les bilans réalisées pour chacune des parcelles montre :

- des différences entre parcelles assez faible. En 1996, le drainage varie de 538 à 653 mm pour l'ensemble des parcelles et de 538 à 611 mm pour les parcelles cultivées.
- par contre les différences inter-annuelles sont considérables, puisque le drainage varie d'environ 60 mm en 1997 à 600 mm en 1996. Ceci est en relation directe avec l'importance de la pluviométrie.

(34) Suivi sur le terrain : Concentrations en nitrate



Un suivi des solutions du sol a également été réalisé. Des prélèvements tous les 1 ou 2 jours ont été effectués, ce qui correspond à environ 2500 prélèvements d'eau sur la campagne 1996.

Pour chaque prélèvement, les concentrations de nitrate, ammonium et de potassium ont été mesurées.

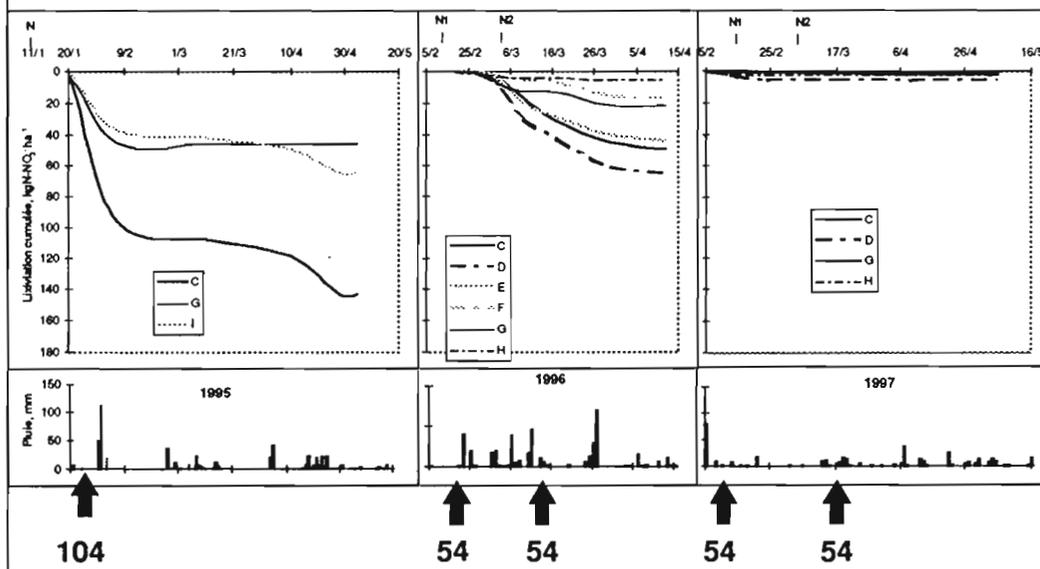
Nous avons pu ainsi suivre l'évolution des concentrations des percolats au cours du temps.

Le trait rouge correspond au seuil de pollution de 11,3 mg/l d'N nitrique soit 50 mg/l de nitrate.

On observe 2 pics de nitrate au dessus de ce seuil, à la suite de chaque apport d'engrais.

On constate que les concentrations restent en dessous du seuil sous graminées fertilisées et, bien sûr sous légumineuses non fertilisées. Par contre, sous maïs, les concentrations de nitrate atteignent 80 à 100 mg/l à la suite des apports de fertilisants.

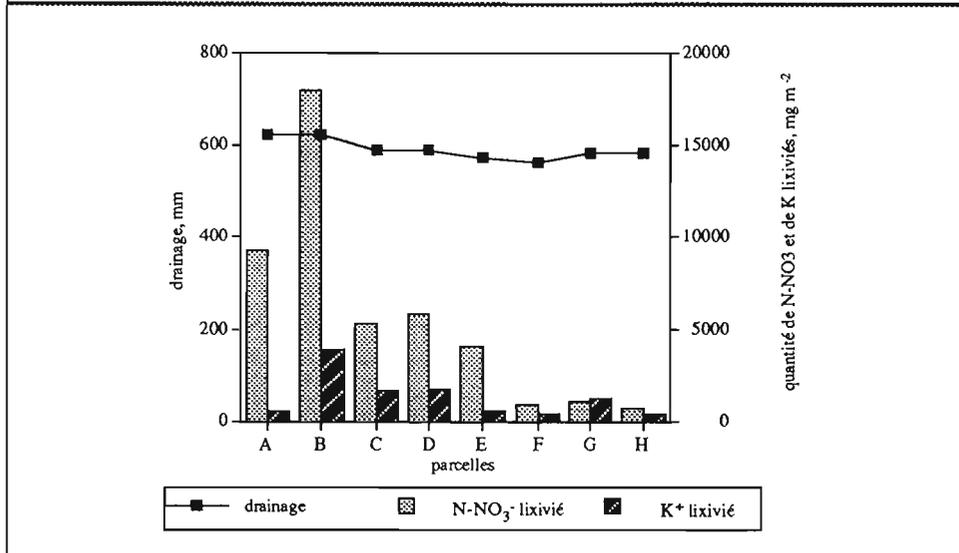
(35) Suivi sur le terrain : Lixiviation cumulée du nitrate



La lixiviation a pu être estimée à partir des calculs de drainage et des mesures de concentration en nitrate.

La lixiviation sous maïs a atteint 140 kg en 1995 et 50 kg en 1996. Elle a donc été beaucoup plus importante en 1995 qu'en 1996, malgré une pluviométrie plus faible. Ceci est essentiellement dû au fractionnement de l'apport d'engrais à partir de 1996.

(36) Suivi sur le terrain : Lixiviation de l'azote et du potassium



En même temps que le nitrate, nous avons suivi le devenir de l'ammonium et du potassium.

La lixiviation de l'ammonium est pratiquement nulle car l'ammonium n'est pas présent dans les solutions du sol du fait de sa nitrification rapide.

Le potassium est lixivié en moins grande quantité que le nitrate pour des apports sensiblement identiques. De 10 à 20 kg / ha de potassium ont été lixiviés. Sa rétention par le complexe d'échange ainsi que sa consommation rapide (et parfois en quantité supérieure aux besoins) expliquent probablement ce phénomène. Bien que le potassium ne pose pas de problème de pollution, il est souhaitable que les pertes soient réduites au maximum afin que l'utilisation par les plantes soit correcte.

(37) Conclusions

- Les craintes de lixiviation sont fondées
- Le fractionnement des apports réduit la lixiviation
- Le choix des cultures a également une incidence
- Lors d'une gestion raisonnée, les teneurs moyennes en nitrate restent modérée

Les craintes de lixiviation sont fondées puisque nous avons observé des lixiviations de 140 kg/ha de N sur un cycle cultural en saison des pluies sous maïs. En effet, un épisode pluvieux très important (de l'ordre de 200 mm) est susceptible de lixivier la presque totalité de l'azote du profil.

Toutefois, le fractionnement de l'azote (même un simple fractionnement en 2 apports) a montré son efficacité pour réduire la lixiviation. Celle-ci n'était que de 50 kg/ha en 1996 malgré une pluviométrie très forte.

Certaines cultures présentent en outre des risques plus importants. Le maïs, qui d'une part est une culture en ligne qui colonise assez mal l'interligne dans les conditions de culture étudiées et qui, d'autre part, prélève son N pendant une période relativement courte (cycle végétatif de 4-5 mois), présente des risques assez importants. Les graminées, même fertilisées, présentent des risques plus réduits probablement en raison de la présence d'un système racinaire bien développé dès le début du cycle de culture. Les prairies de légumineuses, non fertilisées, présentent des risques très réduits.

L'année 1996 peut être considérée comme une année à risque élevé sur le plan climatique. La gestion mieux raisonnée de l'apport d'engrais qu'en 1995 conduit à une lixiviation de 50 kg/ha d'N pour 600 mm de drainage. La concentration moyenne de nitrate est donc, sous maïs, de 38 mg/l contre plus de 200 mg/l en 1995! Nous sommes donc en dessous des normes de pollution pour la culture la plus polluante du système. Sous graminées, les teneurs sont 2 fois plus faibles.

(38) Rôle de la minéralisation de l'azote dans la production de nitrate.

- Rappels sur le cycle de l'azote
- Importance de la minéralisation et de la nitrification
- Incidence sur la gestion de l'azote et les risques de pollution

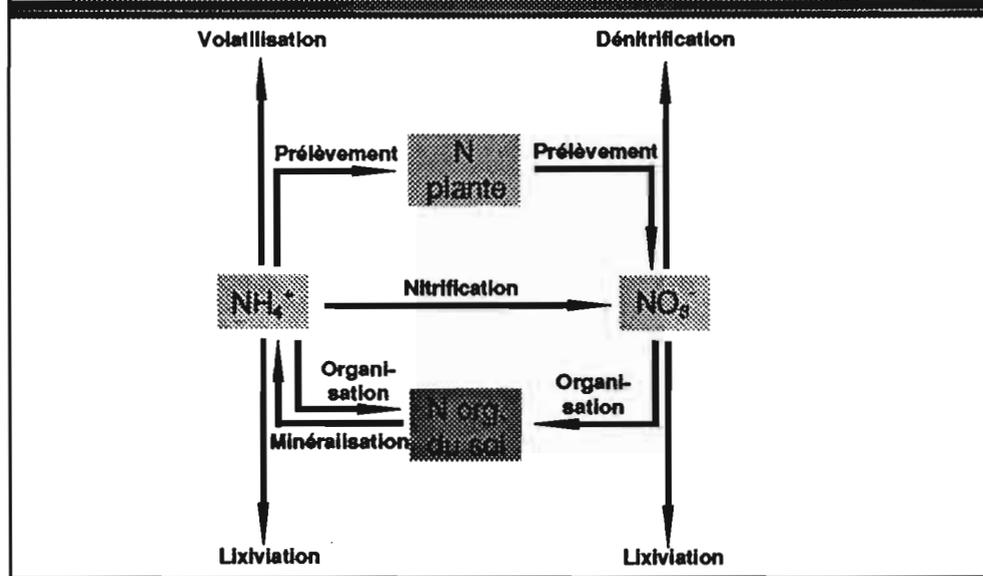
Nous avons vu précédemment les travaux que nous avons réalisés pour suivre les flux de nitrate dans le sol et essayer de quantifier les pertes par lixiviation.

Toutefois, le nitrate que l'on retrouve dans les eaux de drainage n'a pas forcément pour origine unique l'engrais apporté. La production lors de la minéralisation peut jouer un rôle très important.

Avant de vous présenter quelques résultats obtenus sur la production de nitrate lors de la minéralisation, je vais faire un bref rappel sur le cycle de l'azote.

Je terminerai par quelques éléments qui pourront alimenter notre discussion finale sur l'incidence de la minéralisation et de la nitrification dans la gestion de l'azote et sur les risques de pollution de la nappe.

(39) Le cycle de l'azote



Le cycle de l'azote dans le système sol-plante met en jeu un ensemble de processus complexes. Dans la gestion de l'azote et la prévision du risque de pollution il est important d'en tenir compte.

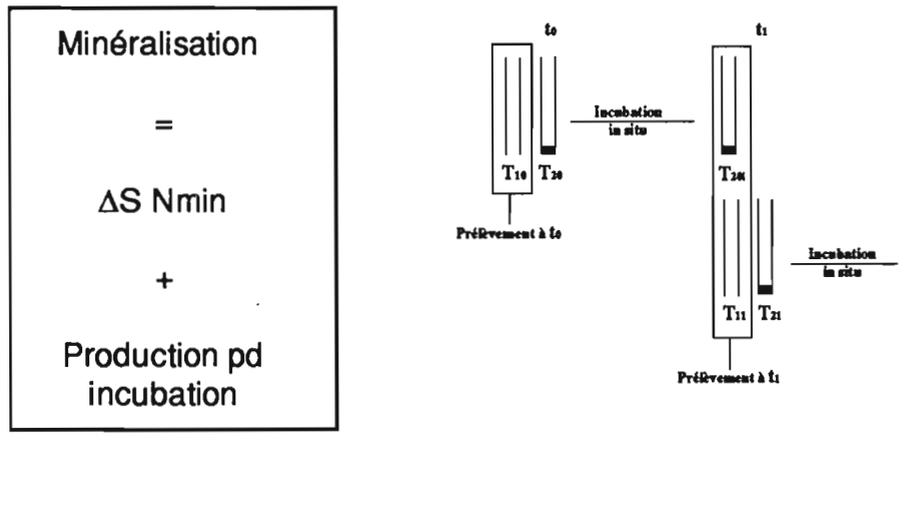
Les plantes prélèvent dans le sol de l'azote minéral qui peut avoir 2 formes l'ion ammonium, NH_4^+ , et l'ion nitrate, NO_3^- , qui est généralement la forme la plus prélevée par les plantes cultivées. Cet azote a 2 origines :

- l'engrais ;
- la fourniture du sol.

L'apport par l'engrais est facilement quantifiable et relativement facile à gérer. La fourniture par le sol met en jeu de très nombreux mécanismes

- tout d'abord, la production par la minéralisation de la matière organique. du sol, puis, éventuellement par la nitrification qui transforme l'ammonium en nitrate.
- cependant l' N_{min} peut être utilisé par les micro-organismes du sol et être réorganisé sous forme d' N_{org} .
- De plus, le nitrate et l'ammonium peuvent subir diverses pertes
 - soit par voie gazeuse : il s'agit de la volatilisation d'ammoniac qui augmente avec le pH du sol (en présence de carbonate de calcium (calcaire corallien), le pH peut être relativement élevé et ces pertes peuvent ne pas être négligeables ; la dénitrification qui est la transformation (biologique) du nitrate en oxydes d'azote gazeux en conditions anaérobies, ce processus est probablement d'importance mineure sauf, peut-être, dans le cas d'épisodes pluvieux très important faisant suite à un apport d'engrais. Ces pertes sont très difficiles à quantifier.
 - par lixiviation comme nous l'avons vu auparavant.

(40) Quantification de la minéralisation



La minéralisation de l'azote est complexe à mesurer. Une des méthodes consiste à déduire la minéralisation à partir du bilan d'azote. Cependant, cette méthode nécessite d'évaluer correctement les prélèvements par les plantes en tenant compte des racines et des adventives (et pas seulement les exportations).

De plus cette méthode :

- ne permet pas de distinguer les 2 formes d' N_{min} ;
- conduit à une destruction importante des parcelles si l'on veut suivre les variations de la minéralisation au cours du temps et pas seulement un bilan global sur l'ensemble du cycle cultural.

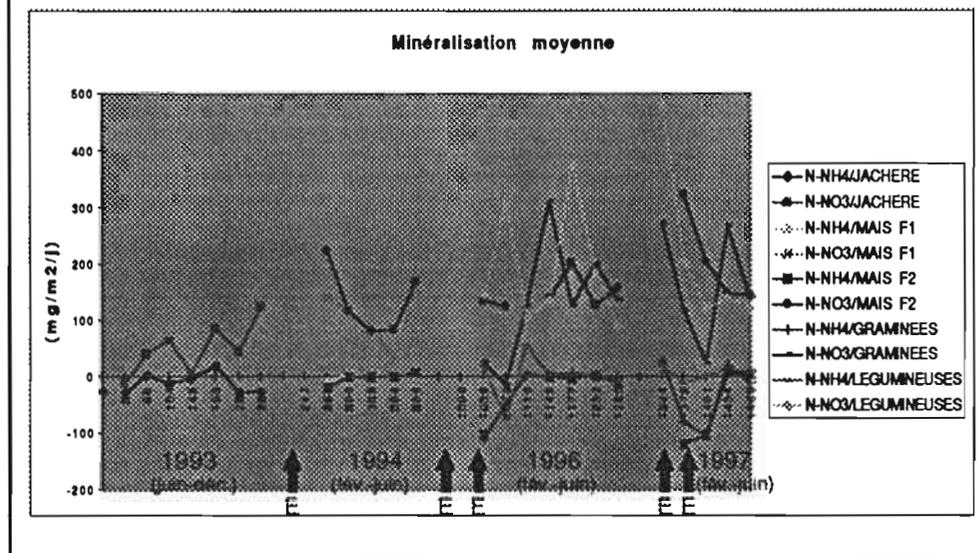
Nous avons utilisé une méthode d'incubation *in situ* pour estimer la minéralisation et la nitrification. Elle consiste à isoler des colonnes de sol qui sont laissées en place. Le sol dans la colonne n'est plus soumis aux prélèvements par les plantes. L'augmentation des teneurs en N_{min} dans la colonne est alors imputable à la minéralisation.

La minéralisation ou la nitrification peuvent être quantifiés en :

- mesurant la variation de stock dans le sol non incubé ;
- en ajoutant la production d' N_{min} pendant l'incubation, cette dernière correspondant à l' N_{min} dans la colonne incubée moins l' N_{min} initial + l' N_{min} piégé au niveau de résines échangeuses d'ions placées à la base des colonnes afin de piéger l' N_{min} lixivié.

(DIAPOS)

(41) Minéralisation et nitrification journalières



Des incubations d'un mois environ ont été réalisées :

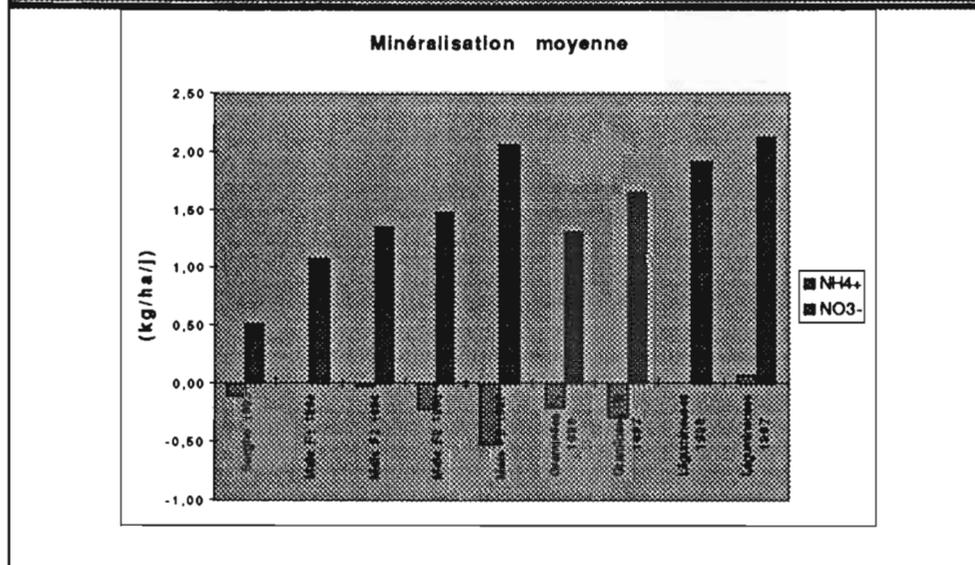
- pendant une saison sèche, sous culture de sorgho, en 1993 ;
- pendant trois saisons humides,
 - sous maïs, pour 2 niveaux de fertilisation, en 1994
 - sous Maïs F2, graminées F2 et légumineuses en 1996-1997.

Ces données montrent des variations importantes dans la minéralisation de l'N organique.

Quelques points importants peuvent être mentionnés :

- la minéralisation nette reste toujours proche de zéro du fait d'une transformation rapide de l'ammonium en nitrate.
- la nitrification nette est par contre très importante : elle peut atteindre 2 à 3 kg / ha / j à certaines périodes de la saison humide.
- les variations de la nitrification pendant la saison humide n'ont pas pu être reliées de façon significative avec l'humidité du sol. Il existe un optimum d'humidité pour la minéralisation et la nitrification. La nitrification est nulle lorsque le sol est proche de la saturation : la faible nitrification de début 1996 peut s'expliquer par l'excès de pluviométrie à cette période ; sur graminée, où la surface du sol est plus compacte, cet effet peut-être accru. Les creux de nitrification pourraient correspondre par ailleurs à des périodes d'assèchement de l'horizon de surface.
- la nitrification peu être plus forte en début de saison des pluies, comme cela semble être le cas début 1997, du fait de l'accumulation de composés organiques (microbiens) très facilement biodégradable.
- La nitrification semble, par contre, nettement plus réduite en saison sèche.
- l'apport d'engrais semble par contre favoriser l'immobilisation d'NH₄.

(42) Minéralisation et nitrification moyennes



Les minéralisations moyennes obtenues sur les différentes saisons culturales montrent :

- une minéralisation nulle voir une immobilisation nette d' NH_4
- une nitrification assez réduite en saison sèche, de l'ordre de 0,5 kg d'N / ha / j.
- en saison humide, la nitrification peut fournir de 1 à 2 kg d'N / ha / j.
- il y a peu de variations interannuelles.
- sur maïs, en 1994, nous n'avons pas détectés de différence dans la nitrification entre les deux niveaux de fertilisation.
- par contre, les parcelles fertilisées nitrifient moins que les prairies de légumineuses non fertilisées, la nitrification étant plus réduite sous graminée, du fait, probablement d'une aération moins bonne de l'horizon de surface en absence de travail du sol.
- Une production de 100 à 200 kg / ha d'N- NO_3 peut être escomptée pendant le cycle cultural de la saison des pluies ; d'environ 50 kg / ha d'N- NO_3 sur le cycle cultural de la saison sèche.
- Une immobilisation d'ammonium a lieu dans les parcelles fertilisées. Elle est d'environ 60-65 kg d'N ce qui correspond à l'ammonium apporté par l'engrais (62 kg d'N).

(43) Comparaison avec la méthode du bilan

Bilan	Maïs 96	Maïs 97	Gram. 96	Gram. 97	Lég. 96	Lég. 97
Apport Eng.	104	104	104	104	0	0
Nitrif.	100	198	11	131	168	138
Immob. Eng.	43	60	63	45	0	0
ΔS	- 4	- 4	0	0	2	1
Lixiv	50	2	22	1	10	1
Prélèv. (calc)	115	244	30	189	156	136
Prélèv. (mes.)	42	52	72		99	

Nous avons tenté de réaliser un bilan d'azote, sur les périodes où nous avons suivi la lixiviation. Ce bilan a permis de calculer le prélèvement des plantes. Nous avons comparé ces valeurs calculées avec les mesures de rendement effectuées. Dans ces dernières mesures, nous ne prenons donc pas en compte :

- l'N contenu dans les racines des plantes (ou exsudés par les plantes) ;
- les mauvaises herbes dont l'importance peut être très forte sur maïs.

- Pour 1996, année humide, les valeurs de prélèvements mesurées et calculées semblent assez cohérentes : pour la légumineuse, la valeur supérieure de 50 kg doit correspondre à l'azote racinaire ; pour le maïs qui était assez enherbé, la différence est plus importante ; dans le cas des graminées, la nitrification est probablement sous estimée.

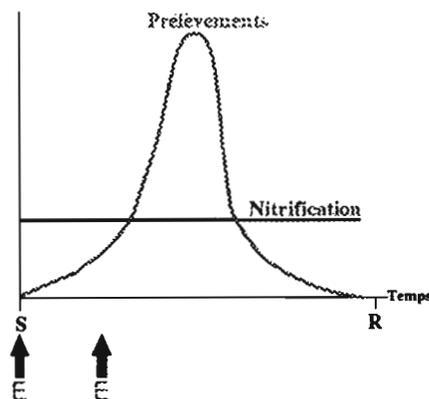
- Pour 1997, année sèche, les prélèvements calculés semblent excessifs sur maïs et graminées sans que nous ayons d'explication claire à proposer.

Ces résultats confirment par ailleurs qu'une **production de nitrate à partir de l'N org du sol peut être estimée à :**

- 1 - 1,5 kg / ha / j sous culture et prairie de graminées
- 1,5 - 2 kg / ha / j sous prairie de légumineuses.

(44) Incidence sur la gestion de l'azote

- La nitrification est une source importante d'N
- Le fractionnement a un effet positif ;
- L'utilisation de l'azote par la plante reste faible ;
- L'azote n'est sans doute pas le principal facteur limitant.



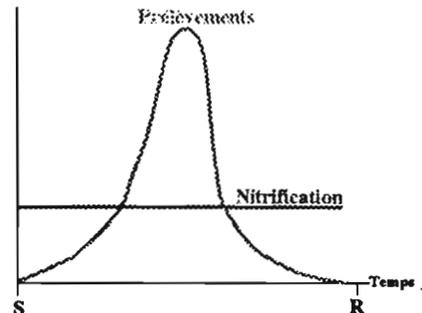
Voici, présenté de façon très schématique, les apports d'azote par la nitrification et les engrais comparés à la consommation des plantes.

On peut noter que :

- la nitrification est une source non négligeable d'N pour les cultures Elle peut fournir : de 100 à 150 kg / ha sur le cycle cultural lors de la saison des pluies ; de 40-50 kg / ha sur le cycle cultural de contre saison. Ainsi, les niveau de rendement ne varient pas beaucoup en fonction des niveau d'apport d'engrais. On constate également que les patates douces qui n'étaient pas fertilisées ont apparemment des croissances correctes. En cas d'irrigation, il est probable que cette nitrification augmenterait pour atteindre des niveau comparables à ceux de la saison des pluies.
- le fractionnement de l'apport d'engrais a probablement un effet bénéfique. Un apport unique au semis est sans doute assez mal adapté car la plante a des besoins faibles et la nitrification est en grande partie capable de subvenir à ses besoins en début de cycle.
- même après fractionnement, le premier apport, au semis, est probablement assez mal valorisé du fait d'une fourniture azotée importante du sol (qui peut même être plus importante après la première pluie).
- Le second apport est sans doute beaucoup mieux valorisé par la plante qui a des besoins qui excèdent la production par la nitrification, et ceci d'autant plus que les rendements (ou les objectifs de rendements) sont importants.
- Toutefois, les rendements observés étaient faibles notamment sur maïs ; l'N n'est peut-être pas le principal facteur limitant du développement des cultures et dans ce cas l'apport par la fumure ne peut pas être correctement valorisé.

(45) Incidence sur les risques de pollution

- Persistance de la nitrification à des période où les plantes consomment peu
- Apports complémentaires d'engrais



- La persistance de la minéralisation à des période de faible consommation d'N par la plante induit un risque difficile à maîtriser. D'ailleurs, les teneurs non négligeables observées au niveau de la nappe sont plus probablement dues à la lixiviation de nitrate produit lors de la nitrification que de nitrate apporté par les engrais [l'utilisation de ces derniers étant trop faible actuellement pour expliquer ces concentrations].
- Un des seuls moyens de capter le nitrate produit est la présence d'une plante active.
- les systèmes de type prairie, où la consommation d'N s'étale sur une période plus longue, présentent donc des risques plus limités.
- Des systèmes de culture avec diverses plantes à divers stades pourrait être une bonne solution dans le cas, par exemple, de cultures maraîchères assez intensives. Mais ces systèmes sont sans doute plus complexes à maîtriser.
- Il existe également des inhibiteurs de nitrification (qui sont utilisés notamment aux Etats-Unis, mais je connais mal leur modalités d'utilisation).
- L'utilisation d'engrais minéraux est sans doute nécessaire. Les modalités d'application (date, fractionnement, localisation) doivent être optimisées. Toutefois, la gestion de l'engrais est beaucoup plus simple que celle de la nitrification (même si l'on ne peut pas maîtriser les dates des précipitations). On doit donc pouvoir atteindre des niveaux corrects d'utilisation de l'N de l'engrais par la plante et une faible lixiviation. Ce risque de lixiviation ne peut cependant pas être éliminé car on ne maîtrise pas suffisamment les prévisions météorologiques.
- Ces résultats vont dans le même sens que ceux obtenus sous climat tempéré qui montrent que le risque majeur de pollution est lié à la minéralisation de la matière organique
- Un point important concerne les risques liés au retournement des prairies, aux apports de compost... Nous ne savons pas très bien quelles seront les conséquences de ces apports sur la minéralisation et la nitrification.

(46) Conclusion

- Un risque de pollution lié en partie à la minéralisation et à la nitrification
- Une bonne gestion des engrais indispensable
- Déterminer les facteurs limitants.

- Les risques de pollutions sont liés pour une part non négligeables à la production de nitrate au cours de la minéralisation et de la nitrification. La gestion du risque est complexe, mais cette production doit être prise en compte dans le raisonnement des fumures.
- Une gestion rigoureuse des apports d'engrais reste indispensable. Le fractionnement maximum doit être recommandé pour faire face aux aléas climatiques dont les dates sont peu prévisibles. Ce point nécessite cependant de poursuivre des études expérimentales, les plantes ayant besoin d'une certaine teneur en nutriments pour bien pousser. Le placement des engrais peut être également une solution, mais qui nécessite elle-aussi des études expérimentales.
- L'amélioration de l'utilisation de l'azote par la plante est également un moyen de réduire le risque de lixiviation. Pour cela, il faut déterminer les facteurs limitants du rendement et tenter de limiter leur impact (je pense notamment au phosphore pour lequel je vais vous présenter quelques données).

(47) Rétention et disponibilité du phosphore

- Rappels sur la rétention des anions
- La disponibilité du phosphore dans les sols de Maré
- La rétention du phosphore
- Comment améliorer la disponibilité ?

Le phosphore pose également un problème majeur pour la fertilité de ces sols. Dans ce cas, il ne s'agit pas d'un problème de pollution car le risque de lixiviation est inexistant. Au contraire, c'est un problème de disponibilité du phosphore pour les cultures qui se pose.

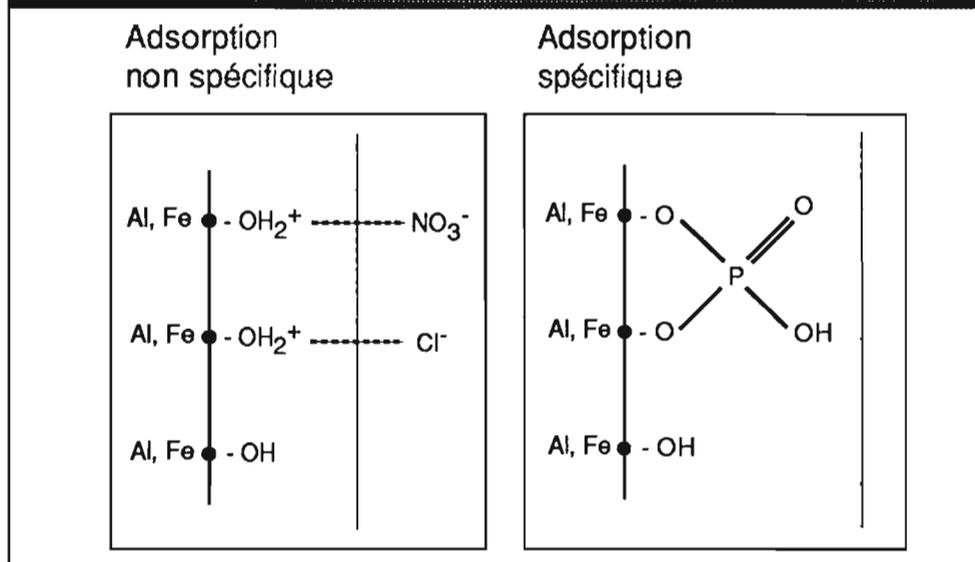
Tout d'abord, je vais faire quelques rappels très généraux sur la rétention des anions par les sols.

Ensuite, je présenterai quelques résultats sur les teneurs en P des sols et sur sa disponibilité pour les plantes.

Je présenterai ensuite quelques résultats sur l'évaluation de la rétention du P en fonction des caractéristiques du sol.

Je terminerai par quelques réflexions sur les moyens d'améliorer cette disponibilité.

(48) Rappels

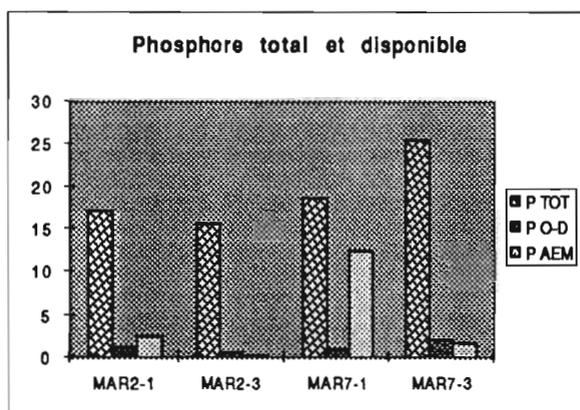


L'adsorption des anions par les oxydes de fer et d'aluminium est due à la présence de charges électro-positives à leur surface. Cette charge est d'ailleurs d'autant plus positive que le pH diminue en dessous de pH 8 environ.

On distingue 2 types d'adsorption :

- l'adsorption non spécifique ou adsorption de sphère externe. Les ions chargés négativement sont attirés par les charges positives des oxydes. La liaison entre l'anion et l'oxyde est de type électro-statique. Ce sont des liaisons très faibles. Les éléments restent très mobile et très disponible. C'est ce type de liaison qui interviennent pour le nitrate et le chlorure.
- l'adsorption spécifique ou adsorption de sphère interne. Les ions forment des liaisons covalentes avec la surface de l'oxyde. Ce sont des liaisons très fortes et plus ou moins irréversible. Les éléments sont alors très peu disponible. C'est le cas du phosphate, du silicate et, en partie, des anions organiques.

(49) Disponibilité du phosphore



Ce graphique présente pour 2 profils de sol, l'un (MAR2) provenant de Tawaïnèdre, l'autre (MAR7) provient de Taodé et a une teneur en M.O. nettement plus importante, et deux horizons de chaque profil, un de surface, l'autre de profondeur :

- le phosphore total
- et le phosphore "dit assimilable" mesuré par 2 technique :
 - la méthode Olsen-Dabin qui est assez classique ;
 - une méthode utilisant des membranes échangeuses d'anions.

Les 2 premiers sont exprimés en ‰ et le troisième en ppm, c'est à dire qu'il y a un facteur 1000 entre les 2 types de P assimilable.

- On constate qu'il y a des teneurs considérables de P total, de l'ordre de 2 % du sol total.
 - Les teneurs de P ass par la méthode Olsen-Dabin restent importantes de 1 à 2 ‰ selon les horizons. Les valeurs varient relativement peu. Ces valeurs correspondent généralement à des sols bien pourvu en P. Or les études en serre que nous avons réalisés montre au contraire qu'il y a de fortes carences en P dans ces sols.
 - L'utilisation des membranes échangeuses d'ions donne des résultats de teneur en P assimilable 1000 fois plus faible que la méthode Olsen-Dabin. Ceci est plus conforme aux carences observées en serre. De plus, cette méthode fait apparaître une certaine variabilité dans la disponibilité :
 - la disponibilité est beaucoup plus faible dans les horizons de profondeur que dans ceux de surface ;
 - les sols plus riche en matière organique ont une disponibilité plus grande.
- Cette technique semble mieux adaptée que la précédente pour évaluer le P assimilable de ce type de sol.

(50) La rétention du phosphore

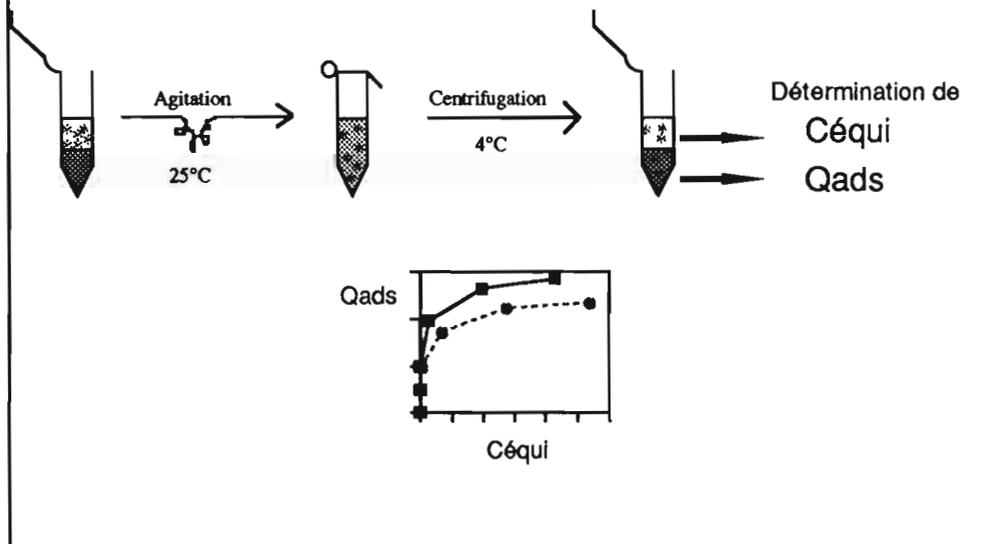
- le phosphore est-il rapidement indisponible ?
- quels sont les constituants impliqués ?
- le phosphore peut-il être libéré ?

A partir de la constatation précédente, plusieurs questions peuvent être posées, comme, par exemple :

- est ce que le P qui sera apporté par l'engrais sera rapidement indisponible ;
- quels sont les constituants impliqués dans la rétention et quels sont les moyens de gestion vis à vis de ce phénomène ;
- le phosphore fixé peut-il être ensuite libéré ?

Nous n'avons malheureusement pas de réponse à toutes ces questions. Nous avons toutefois quelques éléments de réponse.

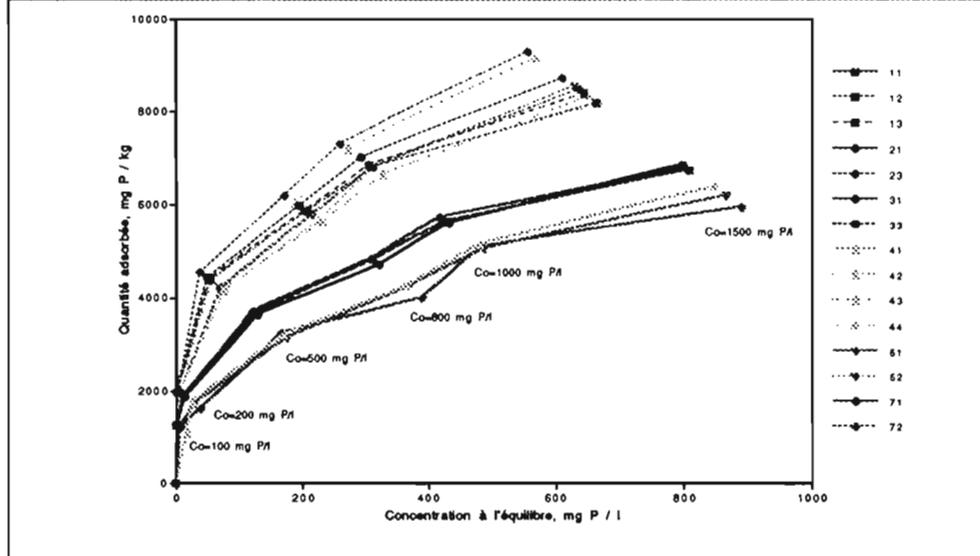
(51) Méthode d'étude



Pour quantifier l'importance de la rétention du phosphore par les sols, nous avons réalisé des isothermes d'échange.

Cette technique consiste à mélanger un échantillon de sol avec une solution plus ou moins riche en P. Après agitation on dose la teneur en P résiduelle de la solution et on calcule le P qui s'est fixé sur le sol. On réalise ceci pour diverses concentrations de P, ce qui permet d'obtenir les courbes reliant la C de P à l'équilibre et le P adsorbé.

(52) Isothermes d'adsorption

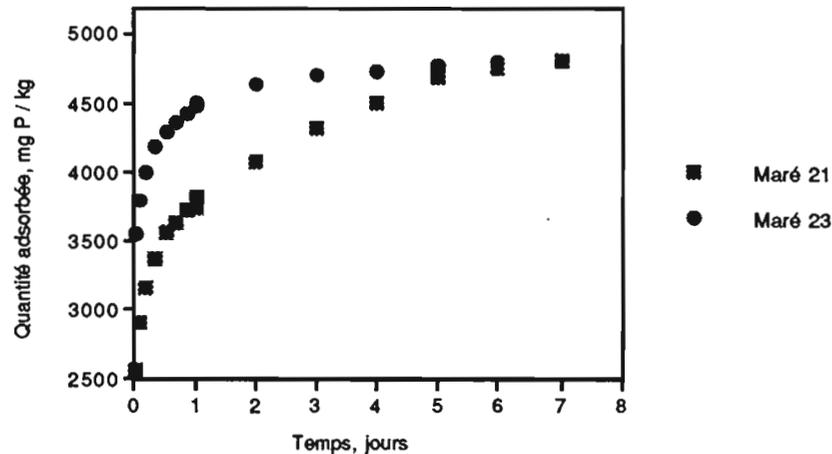


La détermination des isothermes d'adsorption a été réalisée pour divers profils de sol provenant des stations de Tawaïnèdre et Taodé.

Quelques constatations peuvent être faites :

- La dose maximale apportée correspond à une concentration de 1500 mg/l de P, ce qui est équivalent à un apport de 15 t de P ou plus de 30t de P₂O₅. Malgré ces apports considérables, nous n'avons pas atteint la capacité maximale d'adsorption du sol !
- Il y a 2 groupes distincts de courbes qui apparaissent sur le graphique :
 - celles où la capacité d'adsorption est apparemment la plus importante correspondent aux horizons de profondeur des sols.
 - celles où la capacité d'adsorption est apparemment la plus faible correspondent aux horizon de surface. Parmi ceux-ci, ceux de Taodé, qui sont plus riche en M.O. adsorbent moins le P que ceux de Tawaïnèdre.

(53) Vitesse de fixation du phosphate

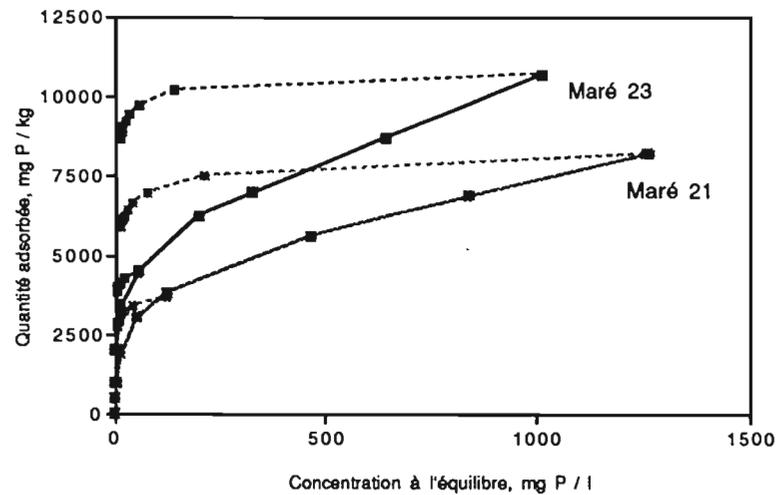


Les isothermes précédentes correspondent à des mises en contact du sol de 24 h. Si l'on prolonge la durée de mise en contact sur un horizon de surface et un horizon de profondeur, on constate que, dans les 2 cas, on obtient un niveau de fixation du P identique. En fait, sur l'horizon de surface, la vitesse d'adsorption est simplement retardée. L'adsorption apparemment plus réduite observée précédemment correspond seulement, en fait, à une vitesse d'adsorption plus lente.

La matière organique a donc un effet retardateur sur l'adsorption du P, mais elle ne réduit pas l'adsorption. Ce phénomène est toutefois très important en ce qui concerne la gestion des apports de P.

Il faut toutefois noter que les vitesses de fixation notées ici ne correspondent pas du tout à la réalité. Ici nous sommes dans des conditions expérimentales où le sol est mis en agitation dans une solution de P. Dans les expérimentations réalisées au champs dans le Sud, nous avons pu voir que des apports de 10 t de P₂O₅ étaient fixés de façon irréversible sur le sol en 3 ans.

(54) Désorption du phosphate



Après avoir fixé du P sur le sol, nous avons tenté de le désorber en agitant le sol dans les même conditions que précédemment mais en utilisant une solution sans P.

On observe, au cours des divers cycles successifs de désorption que très peu de P est désorbable. Le P fixé sur les oxydes de Fe et Al l'est de façon quasi irréversible.

(55) Conclusions

- Agir sur la matière organique
- Agir sur la capacité de fixation du sol

Les apports de P réalisés lors des expérimentations au champs sont modestes (100 kg/ha) par rapport aux besoins estimés lors d'expérimentation en serre pour lever les carences en P (3 T/ha). La très faible disponibilité du P mesurée avec les membranes échangeuses d'ions montre que le P est très probablement l'élément, ou un des éléments, majeur qui limite les rendements des cultures. L'amélioration de sa disponibilité est donc particulièrement importante dans ce type de sol.

Des apports très importants sont sans doute difficile à envisager pour des raisons économiques hormis, peut-être, sur des cultures maraîchères à forte valeur ajoutée. Ceci d'autant plus, que les apports, même importants, ont une efficacité limitée dans le temps.

Dans tous les cas, des apports réguliers (annuels) sont favorables, la fixation étant progressive. Les niveaux d'apports optimum nécessitent toutefois d'être précisés.

La matière organique semble être un élément majeur pour limiter la fixation du P bien que le problème de la fixation demeure. L'apport de compost est sans doute une voie à tester. On peut même envisager de fabriquer des composts enrichis en P : le P serait transformé en formes organiques et libéré plus progressivement lors de la minéralisation de la M.O. Des voies de recherche sont sans doute à envisager pour l'avenir dans ce domaine.

Une modification de la capacité de fixation du P par le sol à la suite d'apports organiques ou minéraux pourrait également être une voie de recherche. Nous en parlerons brièvement dans la suite de mon exposé.

(56) Objectifs de travail pour les deux années à venir.

- Modélisation des transferts d'eau et de solutés
- Rétention des ions par le sol : effets sur les transferts (nitrate) et la disponibilité (phosphore)
- Risques de pollution lié aux pesticides : biodégradation et rétention

Les recherches envisagées pour les 18 ou 24 mois à venir doivent s'orienter vers 3 axes :

- la modélisations des transferts d'eau et de solutés. C'est un travail qui a déjà débuté grâce à une collaboration établie avec un laboratoire néo-zélandais du HortResearch Institute dans le cadre de la thèse de Céline Duwig. Je vous présenterai les premiers résultats acquis dans ce domaine.

- Les travaux de Céline Duwig et Igor Dubus ont montrés les effets de ce sol sur la rétention des ions et notamment des anions nitrate et phosphate. Une question importante que nous nous posons est : comment peut-on agir sur ces propriétés de rétention de manière à , d'une part, favoriser la rétention du nitrate pour limiter sa lixiviation, d'autre part, limiter celle du phosphore pour augmenter sa biodisponibilité. Des travaux en serre sont envisagés avec Bernard Bonzon afin de faire quelques progrès dans ce domaine.

- Les pesticides sont également une source de pollution majeure qui est à craindre pour les lentilles d'eau douce. Nous n'avons pas encore abordé le sujet pour le moment pour diverses raisons. Au départ, nous avons concentrés nos moyens, financiers et humains sur le devenir du nitrate. Depuis 2 ans, nous avons tenté de démarrer des activités sur les pesticides en collaboration avec des labo spécialisés dans ce domaine. Malheureusement, nous n'avions pas été en mesure de développer des recherches faites d'étudiants pour les réaliser. Une action de recherche vient de démarrer, au Centre de Pédologie Biologique sur la biodégradation des pesticides. Je vous présenterai les objectifs des études envisagées.

(57) Modélisation des transferts d'eau et d'azote

- Le modèle WAVE
- Analyse de la sensibilité des paramètres de modélisation
- Simulation des transferts d'eau et d'azote
- Analyse de scénarios

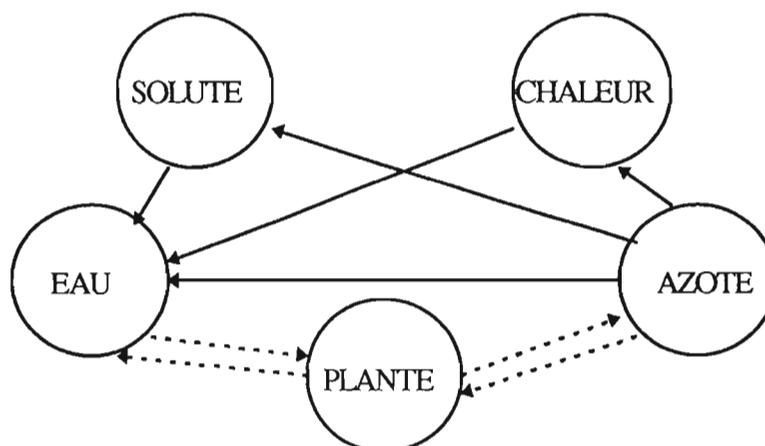
Je vais commencer par vous présenter rapidement le modèle utilisé.

Je présenterai ensuite, à l'aide de quelques exemples la sensibilité de quelques paramètres et leur incidence sur les simulations.

Puis je présenterai quelques résultats des simulations réalisées sur les données acquises lors du suivi au champ.

Pour terminer je présenterai les résultats de l'analyse d'un scénario.

(58) Le modèle WAVE



Nous avons utilisé le modèle WAVE (Water and Agrochemicals in the soil, crop and Vadose Environment).

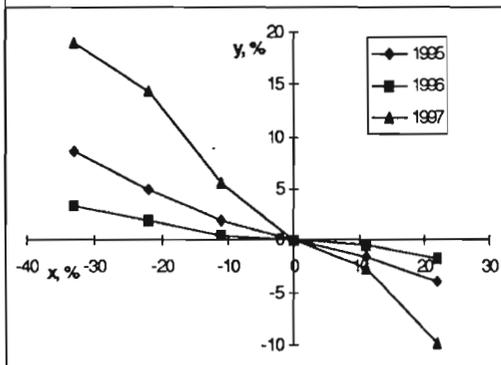
Ce modèle est formé de différents modules. Chaque module fonctionne à partir d'équation physiques dont la résolution nécessite la connaissance de divers paramètres.

Certains de ces paramètres, comme la conductivité hydraulique, ont été mesurés.

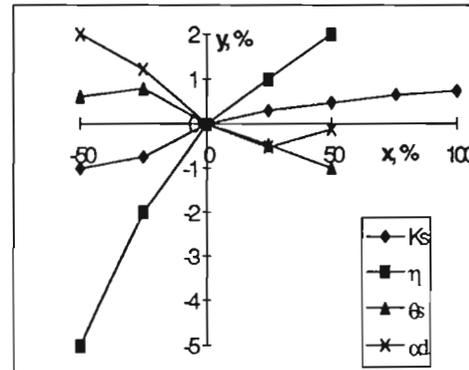
D'autres ont été déterminés de façon empirique au cours de simulations successives sur les données de terrain : c'est le calage du modèle.

(59) Modélisation du drainage : sensibilité des paramètres climatiques et édaphiques

● Sensibilité de l'ETmax



● Sensibilité des propriétés hydrauliques du calcaire



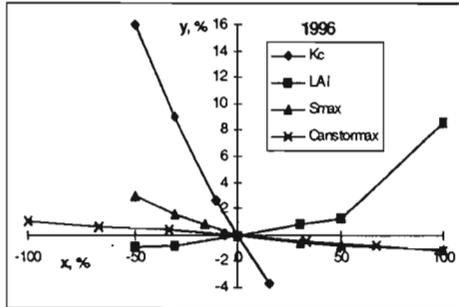
La sensibilité du drainage a été testée sur divers paramètres climatiques ou édaphiques que nous avons déterminés empiriquement.

A titre d'exemple, voici les résultats de la sensibilité du drainage à l'Evaporation maximale ou des propriétés hydraulique du calcaire corallien.

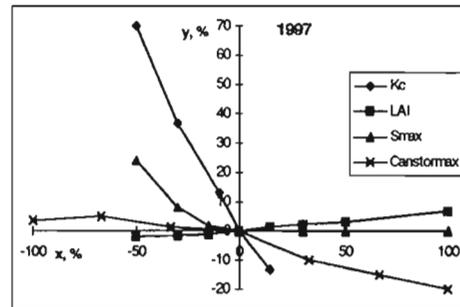
On observe, que la variation de ces paramètres autour d'une valeur optimum (représentée sur l'axe des « x ») ont une incidence réduite sur le drainage (représenté sur l'axe des « y »). En général, les variations sont inférieures à 7-8 % (hormis en année sèche).

(60) Modélisation du drainage : sensibilité des paramètres cultureux

● 1996



● 1997



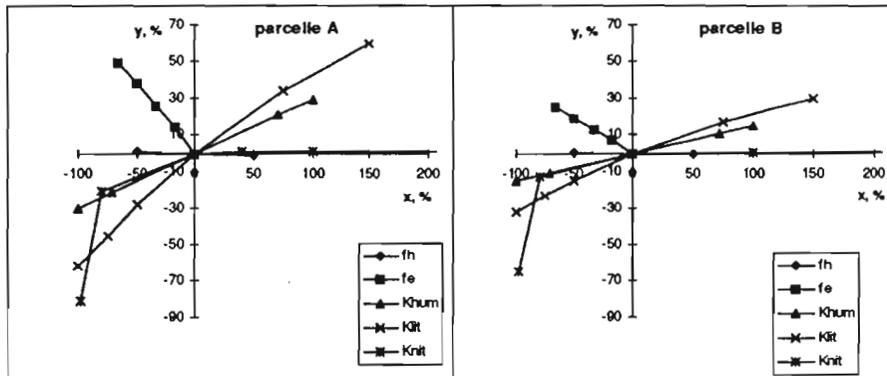
De la même manière, divers paramètres cultureux non mesurés ont été calés.

L'incidence des variations de ces paramètres est modeste en année humide (1996) ; elle est par contre beaucoup plus importante en année sèche (1997). Il faut toutefois rappeler que l'incidence sur le drainage est exprimée en % de celui-ci ; comme le drainage est faible en année sèche, l'incidence quantitative reste modeste.

(61) Modélisation des transferts d'azote : sensibilité des paramètres de transformation de l'N

● Sans engrais

● Avec engrais

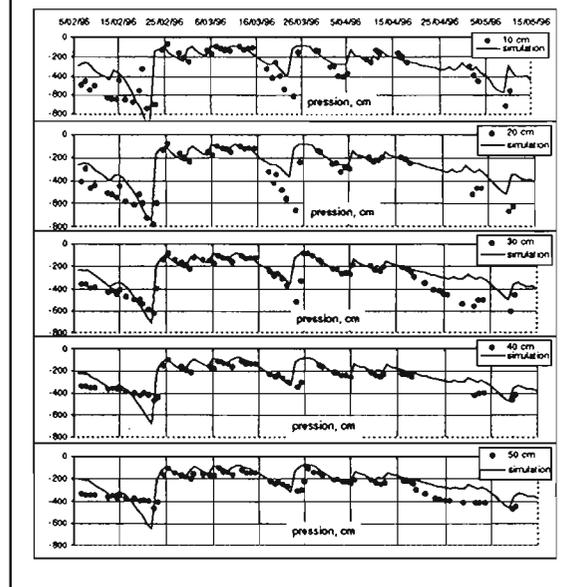


Par contre, la lixiviation est sensiblement plus sensible aux variations des valeurs qui caractérisent les transformations de la matière organique telles que :

- la minéralisation du carbone ;
- l'humification ou
- la nitrification.

De plus, ces paramètres sont invariables dans le modèle : il n'est pas possible d'intégrer des variations prenant en compte les variations des conditions édaphiques au cours du temps.

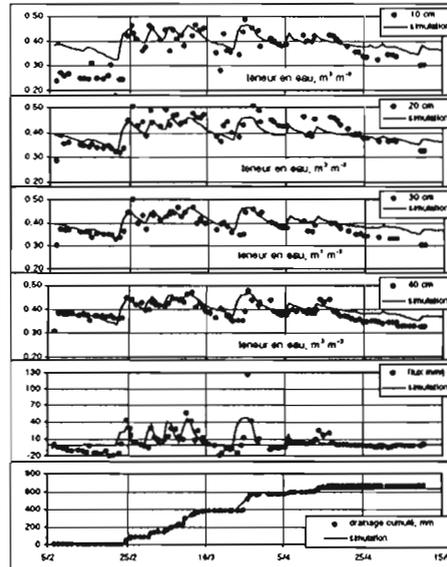
(62) Simulation : Charge hydraulique



A la suite du calage réalisé sur les données de terrain, nous avons pu comparer les données modélisées avec les données de terrain.

En ce qui concerne la charge hydraulique, les données modélisées collent bien aux données de terrain pour 1996.

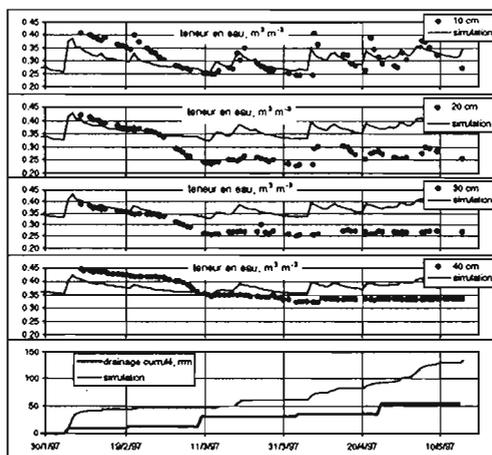
(63) Simulation :
teneurs en eau et drainage
cumulé (1996)



Il en est de même pour les teneurs en eau.

Par conséquent, nous obtenons une très bonne simulation du drainage pour cette période.

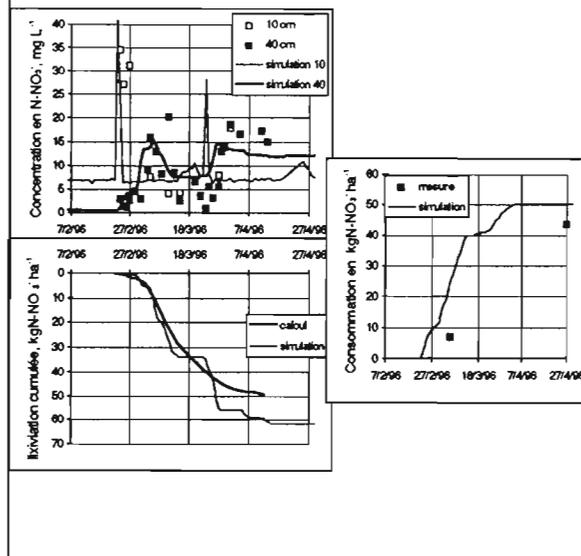
(64) Simulation :
teneurs en eau et drainage
cumulé (1997)



Par contre, le modèle donne des résultats nettement moins bons en 1997 lors d'une saison assez sèche. En particulier, le modèle surestime les teneurs en eau lors des périodes les plus sèches.

Il en découle une surestimation du drainage.

(65) Simulation des transferts d'azote (1996)



En ce qui concerne la simulation des transferts de l'azote, on constate apparemment :

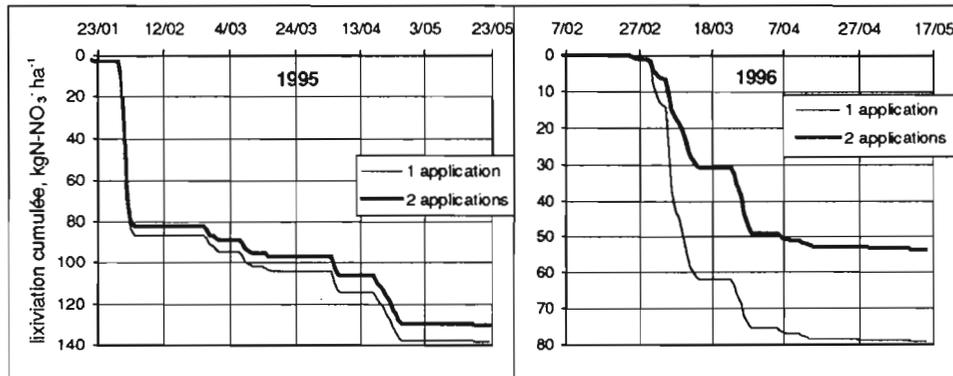
- une sous-estimation des pics de concentration liés aux passages du nitrate apportés par l'engrais ;
- une sur-estimation des teneurs entre ces pics, correspondant à la production interne de nitrate.

Même si le résultat final est à peu près conforme à celui calculé, cette simulation n'est donc pas encore satisfaisante.

(66) Scénarios

● 1995

● 1996



Ce modèle peut permettre de tester des scénarios.

A titre d'exemple, un scénario a été testé : il consiste à comparer les effets de 1 ou 2 apports de fertilisants au cours des années 1995 et 1996.

En 1995, l'apport de l'engrais azoté en 2 fractions aurait eu, semble-t-il un effet modeste : une réduction de seulement 10-15 kg de la lixiviation.

Par contre en 1996, l'apport de l'engrais en une seule fraction aurait conduit une lixiviation de 80 kg d'N au lieu de 50 ; une quantité équivalente à 80 % de l'engrais aurait été perdu par lixiviation au lieu de 50 %.

(67) Objectifs des travaux à développer

- améliorer la définition des paramètres d'entrée du modèle, notamment ceux :
 - de transformation des la matière organique et de l'Nmin
 - de rétention de NO_3^-
- adaptation du modèle à d'autres molécules (pesticides...)
- l'adapter pour en faire un outil utilisable

Les premières étapes de la modélisation ont été réalisées par Céline Duwig grâce à la collaboration de l'équipe du HortResearch.

La poursuite de ces travaux est nécessaire afin

- d'améliorer la définition des paramètres d'entrée du modèle, notamment ceux concernant les transformations de la matière organique et de l'azote et ceux décrivant la rétention du nitrate. Ceci nous permettrait probablement d'améliorer les simulations concernant les transferts d'azote.

- d'essayer d'adapter ce modèle à la quantification du transfert d'autres ions ou d'autres molécules, tel que le potassium, mais aussi des pesticides pour lesquels les suivis de terrain sont difficiles. Ceci permettrait de faire des estimations de risques de pollution pour divers pesticides.

- par ailleurs, ce modèle s'est révélé assez performant pour simuler le drainage. Pour cette partie au moins, il serait nécessaire de l'adapter afin d'en faire un outil plus facilement utilisable, par exemple pour les personnes qui poursuivront des travaux sur le transferts de solutés.

Toutefois, la réalisation de ces objectifs nécessite la poursuite par Céline Duwig de ses travaux au HortResearch. Céline Duwig va soutenir sa thèse le 8 septembre prochain. Elle pourrait poursuivre son travail au HortResearch si nous pouvons la rémunérer sur les financements que nous octroie la Province des Iles Loyauté. Ce travail pourrait se poursuivre pendant une durée de 6 à 18 mois environ selon les priorités qui seront fixées.

(68) Rétention des anions

- L'adsorption du nitrate
- La rétention du phosphore
- Caractérisation de l'AEC et de la CEC
- Quels moyens pour gérer au mieux ces caractéristiques du sol ?

Nous avons vu que l'adsorption du nitrate pouvait avoir un effet bénéfique en diminuant les vitesses de transfert. La force de rétention étant faible, la biodisponibilité du nitrate n'est probablement pas affectée.

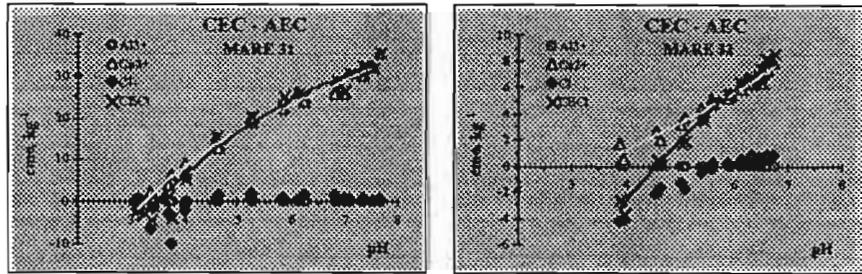
Nous avons également vu, par contre, que la rétention du phosphore est extrêmement forte, ce qui limite très fortement sa disponibilité pour les plantes.

Nous avons commencé à caractériser la capacité d'échange de ces sols avec nos collègues de Montpellier, je vous présenterai un résultat.

La question majeure qui se pose à nous est :

- est-il possible de modifier cette capacité d'échange ;
- dans quelle mesure et par quels moyens peut-on gérer ce phénomène.

(69) Rétention des anions : caractérisation de la CEC et de l'AEC



La capacité d'échange du sol a été caractérisée. La CEC et l'AEC sont respectivement la Capacité d'Echange Cationique et la Capacité d'Echange Anionique. Ces paramètres permettent de quantifier l'importance des charges négatives susceptibles d'adsorber les cations ou positives susceptibles d'adsorber les anions.

La CEC est nettement plus connue car, dans la plupart des sols, l'AEC est nulle ou négligeable.

Dans les sols oxydiques, il n'en est pas de même.

- dans l'horizon de surface, l'AEC est négligeable. La matière organique qui est en quantité importante a des charges négatives qui peuvent induire une adsorption des molécules organiques sur le sol et ainsi masquer les charges électropositives des oxydes.

- dans les horizons plus profonds, l'AEC peut devenir importante notamment lorsque le pH diminue. Elle est toutefois assez proche de zéro au pH du sol.

(70) Rétention des anions :
comment agir ?

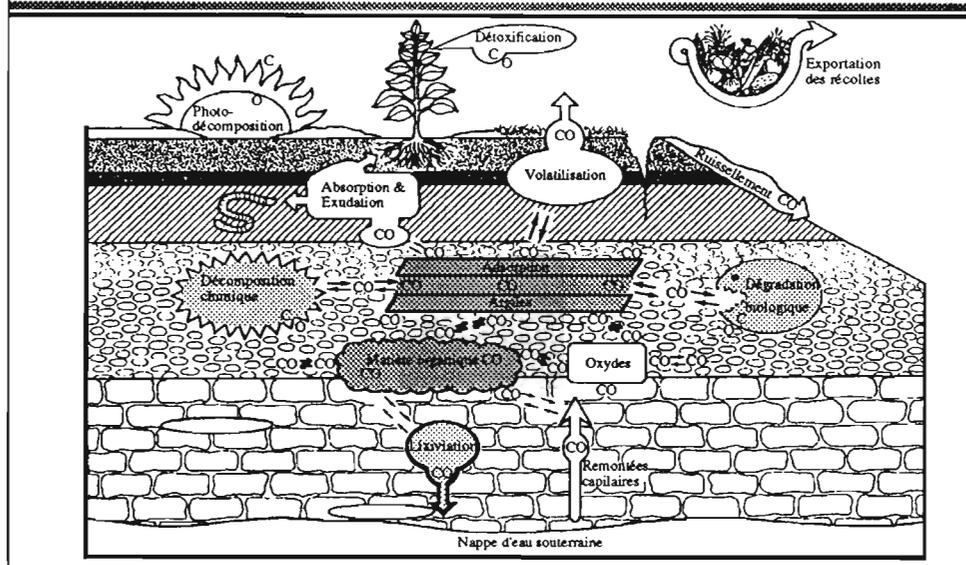
- La matière organique
- quels autres composés ?

La matière organique joue apparemment un rôle majeur comme nous venons de le voir ou comme nous l'avons vu à propos du phosphore.

D'autres composés naturels (telles que des algues) ou de synthèse pourraient présenter un intérêt.

Des expérimentations en serre pourraient être envisagées avec divers composés afin de suivre leur effet sur la disponibilité des éléments pour les plantes et les modifications des caractéristiques physico-chimiques des sols.

(71) Les risques de pollution liés aux pesticides



L'évaluation des risques de pollution des nappes liés aux pesticides nécessitent de comprendre les phénomènes afin de prévoir les risques.

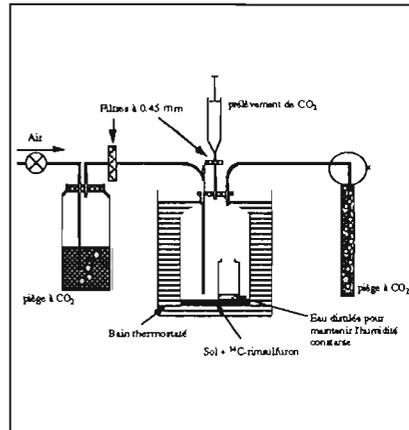
Le modèle de transfert utilisé pour le nitrate est en partie utilisable pour faire des prévisions de transfert d'autres solutés.

Il est cependant nécessaire de mieux connaître divers paramètres décrivant le comportement des pesticides dans ce sol. Les particularités de ces sols rendent en outre impossible les extrapolations acquise sur d'autres sols.

Deux paramètres sont particulièrement important à quantifier au niveau du sol :

- la dégradation des pesticides, qui peut se faire soit chimiquement, soit biologiquement ;
- la rétention des pesticides sur la matière organique ou les oxydes.

(72) Les pesticides : dégradation

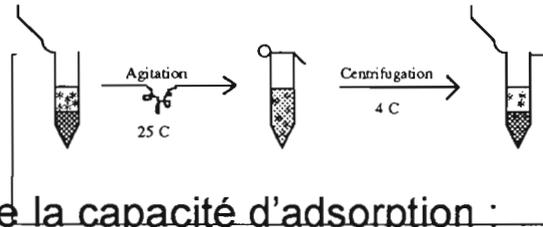


- ^{14}C -pesticides
- Incubation et suivi du $^{14}\text{CO}_2$ dégagé

Le suivi de la dégradation des pesticides peut être réalisé à l'aide de pesticides marqués au ^{14}C au cours d'expériences d'incubation. La dégradation des pesticides est suivie par le dégagement du $^{14}\text{CO}_2$, qui provient de la minéralisation des molécules de pesticide.

Une expérimentation de ce type va débuter prochainement au Centre de Pédologie Biologique à Nancy.

(73) Les pesticides : adsorption



- Etude de la capacité d'adsorption :
 - v Isothermes
 - v Expériences sur colonne de sol
- Influence des caractéristiques physico-chimiques des sols

L'adsorption peut également être suivie lors d'expérimentations en batch similaire à celles réalisées pour le P. Celle-ci permettraient de déterminer les isothermes d'adsorption des pesticides. Des expérimentations sur colonnes de sol, du type de celle réalisées pour le nitrate, peuvent également être envisagées.

Cette adsorption pourra également être reliés aux caractéristiques physico-chimiques du sol.

Quelles recherches en agro-pédologie pour le futur ?

J'ai essayé de présenter un rapide tour d'horizon des travaux déjà réalisés dans le cadre du contrat de développement entre l'Etat - La Province des Iles Loyauté et l'ORSTOM.

J'ai présenté également les objectifs que nous envisageons de poursuivre au cours des 18 mois ou 2 années à venir. Il y a bien évidemment place à la discussion sur ces points.

Au delà de ces échéances, nous pouvons entamer des discussions pour essayer de définir les grands axes de recherche en matière d'agro-pédologie qu'il serait souhaitable de développer.

Nous pouvons revenir, si vous le souhaitez, sur les objectifs des recherches à mener dans le cadre des deux dernières années de ce programme.

Ensuite, je laisserai la parole à mes collègues afin d'animer une discussion plus générale sur le thème "Quelles recherches en agro-pédologie pour le futur ?".