



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

96 INPLD60N

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'AGRONOMIE
ET DES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

BIU NANCY
Service Commun de Documentation
INPL
2, avenue de la Forêt de Haye - B.P. 3
54501 VANDOEUVRE Cédex FRANCE

THESE

Présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

en vue de l'obtention du titre de
DOCTEUR DE L'INPL
Spécialité : Sciences Agronomiques

par

David PALMA-LOPEZ
Ingénieur Agronome

Sujet :

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES POTENTIALITES AGRICOLES ET
DES FLUX AZOTES DANS DIVERS SOLS CULTIVES EN MAIS**

*Soutenue publiquement le 26 Mai 1994,
devant la commission d'examen*

Membres du Jury :

- | | | |
|-------------------|--|-------------------|
| Mrs Ph. DUCHAUFOR | Professeur Honoraire de Pédologie à l'Université de Nancy I | <i>Président</i> |
| F. GANRY | Directeur de Recherches au CIRAD-CA Montpellier | <i>Rapporteur</i> |
| G. GUIRAUD | Directeur de Recherches au CEA Cadarache | <i>Rapporteur</i> |
| Ph. DESVIGNES | Responsable Fertilisation-Environnement Moneville | <i>Examineur</i> |
| L. [obscured] | Directeur des à l'ENSAIA-INPL | <i>Examineur</i> |
| A. [obscured] | Professeur de Pédologie à l'Université de Montpellier | <i>Examineur</i> |
| F. JACQUIN | Professeur à l'ENSAIA-INPL | <i>Examineur</i> |
| Mme T. CARBALLAS | Professeur de Pédologie à l'IIAG -CSIC Santiago de Compostela, Espagne | <i>Invitée</i> |



INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'AGRONOMIE
ET DES INDUSTRIES ALIMENTAIRES**

THESE

BIU NANCY
Service Commun de Documentation
INPL
2, avenue de la Forêt de Haye - B.P. 3
54501 VANDOEUVRE Cédex FRANCE

Présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

en vue de l'obtention du titre de
DOCTEUR DE L'INPL
Spécialité : Sciences Agronomiques

par

[M] 1994 PALMA-LOPEZ, D.

David PALMA-LOPEZ
Ingénieur Agronome

Sujet :

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES POTENTIALITES AGRICOLES ET
DES FLUX AZOTES DANS DIVERS SOLS CULTIVES EN MAIS**

*Soutenue publiquement le 26 Mai 1994,
devant la commission d'examen*

Membres du Jury :

Mrs Ph. DUCHAUFOR	Professeur Honoraire de Pédologie à l'Université de Nancy I	<i>Président</i>
F. GANRY	Directeur de Recherches au CIRAD-CA Montpellier	<i>Rapporteur</i>
G. GUIRAUD	Directeur de Recherches au CEA Cadarache	<i>Rapporteur</i>
Ph. DESVIGNES	Responsable Fertilisation-Environnement à l'AGPM Boigneville	<i>Examineur</i>
L. FLORENTIN	Ingénieur d'Etudes à l'ENSAIA-INPL	<i>Examineur</i>
A. HERBILLON	Professeur de Pédologie à l'Université de Nancy I, Directeur du CPB (CNRS)	<i>Examineur</i>
F. JACQUIN	Professeur à l'ENSAIA-INPL	<i>Examineur</i>
Mme T. CARBALLAS	Professeur de Pédologie à l'IIAG -CSIC Santiago de Compostela, Espagne	<i>Invitée</i>

Terre, j'interroge tes yeux
où danse la fugue des saisons
je me presse et me roule contre toi
dans l'haleine de l'herbe douce
⊗ terre, comme à une femme
je te demande ton secret

Joseph Paul SCHNEIDER
(Sous le chiffre impassible du soleil, 1988)

à : David Julian, Davira Yolanda et Pablo José

AVANT-PROPOS

Ce travail a été effectué dans le cadre du Service Sciences du Sol de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA) de l'INPL, avec la collaboration du Centre Régional de Recherche Agricole du Sud-Est (CEICADES) du Colegio de Postgraduados du Mexique, et les Organismes de la profession agricole de Lorraine et d'Alsace (CRAL et ARAA).

Je remercie d'abord le Conseil National de Science et Technologie (CONACYT) du Mexique et la Société Française d'Exportation des Ressources Éducatives (SFERE), lesquels dans le cadre du XIV programme CONACYT-CEFI m'ont accordé la bourse d'études.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui, à des degrés divers, à différentes étapes de l'évolution de ce travail, m'ont accordé leur temps et fait bénéficier de leurs conseils.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements et ma reconnaissance à Monsieur Ph. DUCHAUFOUR, Professeur Honoraire de l'Université de Nancy I, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury et juger ce travail. La lecture de ses oeuvres nous ont permis de clarifier et de modifier la démarche entreprise au niveau des classifications de sols. Qu'il soit assuré de ma profonde gratitude.

Je ne saurais oublier celui sans qui cette thèse n'aurait pu voir le jour, Monsieur F. JACQUIN, Professeur en Pédologie et Chimie Agricole, responsable de l'équipe Sciences du Sol de l'ENSAIA et Directeur Scientifique de ce travail. Je lui exprime ma profonde reconnaissance pour son accueil bienveillant au sein de son équipe de recherche ; son esprit humanitaire, ses conseils et critiques constructives, son soutien à toute épreuve furent mes meilleurs atouts au cours de ce travail.

Ma profonde reconnaissance va à Monsieur F. GARNRY, Directeur de Recherche et Responsable de l'Unité de Recherches Facteur et Conditions du milieu au Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD-CA), pour sa participation active tout au long de ce travail en tant que Co-directeur Scientifique de cette thèse. Je le remercie pour les discussions fructueuses et ses marques de sympathie ; je suis certain que notre collaboration future ne fera que fructifier.

Je tiens également à remercier Monsieur G. GUIRAUD, Directeur de Recherche au Commissariat à l'Énergie Atomique de Cadarache (CEA), pour l'intérêt qu'il a toujours manifesté à l'égard de ce travail et pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de l'examiner et le juger. Je le remercie pour ses conseils et critiques constructives ; sa rigueur lors du travail au laboratoire a permis à un homme de terrain de comprendre l'importance de la simulation des processus naturels.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur L. FLORENTIN, Ingénieur d'Études à l'ENSAIA, pour l'aide précieuse qu'il m'a toujours apporté lors des différentes étapes du travail : démarche expérimentale, travail de terrain, analyse des résultats et rédaction du mémoire. Qu'il soit assuré de mon amitié et de ma reconnaissance les plus sincères.

Je remercie très vivement à Monsieur A. HERBILLON, Professeur de Pédologie à l'Université de Nancy I et Directeur du Centre de Pédologie Biologique (CPB-CNRS), qui a bien voulu juger ce travail et faire partie du jury malgré ses multiples responsabilités.

A Monsieur Ph. DESVIGNES, Responsable de Fertilisation et Environnement au sein de l'Association Générale de Producteurs de Maïs, j'adresse mes remerciements pour les nombreuses discussions sur les résultats des essais de terrain dans le cadre de la fertilisation azotée du maïs.

Je remercie également Madame T. CARBALLAS, Professeur à l'IIAG-CSIC à Santiago de Compostela, España, qui a bien voulu se distraire de ses multiples activités pour examiner et juger ce travail. Qu'elle soit assurée de ma reconnaissance la plus sincère.

Je remercie tout particulièrement Monsieur P.C. VONG, Ingénieur de Recherche à l'ENSAIA et Responsable du laboratoire des isotopes, pour ses nombreuses interventions lors du travail quotidien de laboratoire, qui ont beaucoup aidé à la définition, la réalisation et l'interprétation de la troisième partie de ce mémoire. Qu'il soit assuré de ma profonde reconnaissance et de mon amitié.

J'associe à mes remerciements Messieurs R. KOLLER et F. LIMAU, Agronomes de l'ARAA et de la CRAL, qui ont toujours participé avec beaucoup d'enthousiasme à la mise en place des essais de fertilisation en Lorraine et Alsace. Je les remercie pour leurs critiques constructives et l'intérêt qu'ils ont montré pour ce travail. Qu'ils soient assurés également de ma sincère amitié et reconnaissance.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé activement à la réalisation de ce travail, particulièrement :

↳ Monsieur M. RONDEAU pour son amitié et sa collaboration lors des études pédologiques des secteurs de références.

↳ Messieurs A. BOURZEIX et D. PEUREUX de la Chambre d'Agriculture de la Meuse pour leur aide lors de l'étude du secteur du Barrois et le suivi des nitrates.

↳ Messieurs GROSJEAN et SIMON de la Chambre d'Agriculture des Vosges pour leur aide lors de l'étude du secteur des Vosges.

↳ Madame BURTIŃ et Messieurs E. HANŃE et D. LASSEŃE pour l'aide lors de l'installation et suivi des essais de fertilisation en Lorraine et Alsace.

↳ Messieurs U. LOPEZ, S. SALGADO, R. TORRES et A. TRUJILLO du CEICADES, pour leur aide lors de l'installation, conduite culturale, traitement des échantillons et analyses de laboratoires des essais du Mexique.

Je n'oublierai pas d'exprimer mes remerciements à mes complices chercheurs du laboratoire Sciences du Sol de l'ENSAIA : Mademoiselle S. ALFAIA, Madame A. BADIANŃE et Messieurs H. CHELOUFI, M. OGNALAGA et S. SULLŃE. Aussi à mon cher ami B. COLIN qui m'a beaucoup appris lors des sorties sur le terrain sur le plan travail et gastronomique. Je dédie aussi une pensée à notre regretté N. LONGA.

Je remercie l'équipe de M. MARTIN à l'INRA de Champenoux ainsi que l'équipe de M. CASABIANŃA du Laboratoire Central d'Analyses (CNRS) à Lyon pour les analyses de l'azote 15.

Je pense également à I. DOSDA et B. BAILLY, qui ont assuré la dactylographie de ce document avec beaucoup de soins (autrement dit merci pour avoir mis en clair mes hiéroglyphes!).

Je ne saurais oublier la participation active et enthousiaste de mon épouse JUDITH ARGELIA à cette aventure.

ABREVIATIONS UTILISEES

AFES : Association Française pour l'Etude du Sol.

ANI : *Added Nitrogen Interaction* ; interaction dans le sol entre l'azote natif et l'azote apporté.

ANVA : Analyse de Variance.

AGPM : Association Générale des Producteurs de Maïs.

CAU : Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote engrais.

CEA : Commissariat à l'Energie Atomique de Cadarache.

CEICADES : *Centro de Enseñanza, Investigación y Capacitación para el Desarrollo del Sureste* ; Centre d'Enseignement et Recherche pour le Développement Agricole du Sud-Est, appartenant au Colegio de Postgraduados du Mexique.

CIRAD-CA : Centre de Coopération Internationale de Recherches Agronomiques et de Développement - Département de Cultures Annuelles.

COMIFER : Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée.

CPB-CNRS : Centre de Pédologie Biologique - Centre National de la Recherche Scientifique.

CPCS : Commission de Pédologie et Cartographie des Sols.

CRAL : Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine.

CRU : Coefficient Réel d'Utilisation de l'azote engrais.

CV : Coefficient de Variation.

E% : Excès isotopique en azote quinze en %.

ET : Ecart Type.

FAO : *Food and Agriculture Organization* ; Organisation des Nations-Unis pour l'alimentation et l'agriculture.

IIAG-CSIC : *Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia-Consejo Superior de Investigación Científica* ; Institut de Recherches Agrobiologiques de la Galice - Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique (Espagne).

INIFAP : *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias* ; Institut National de Recherches Forestières, Agricoles et Animales du Mexique.

IMTA : *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua* ; Institut Mexicain pour la Technologie de l'Eau du Mexique.

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique.

Ndff : *Nitrogen derived from fertilizers* ; fraction de l'azote provenant du fertilisant.

Ndfs : *Nitrogen derived from soil* ; fraction de l'azote provenant du sol.

OPAL : Observatoire des Potentialités Agroclimatiques en Lorraine.

QNdff : fraction de l'azote provenant du fertilisant exprimée en kg ha⁻¹.

QNdfs : fraction de l'azote provenant du sol exprimée en kg ha⁻¹.

SARH : *Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos* ; Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques du Mexique.

Valeur A : représente la quantité d'azote disponible dans une source (air, sol, ou engrais) exprimé en équivalent de l'engrais apporté pour la mesurer.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIÈRE PARTIE : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE, DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE ET MÉTHODES ANALYTIQUES	
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	4
1.1. POTENTIALITÉS DES SOLS	4
1.1.2. QUELQUES EXEMPLES DE SYSTÈMES D'ÉVALUATION DES POTENTIALITÉS DES SOLS	6
1.1.2.1. Les évaluations par inventaire et classement des contraintes	6
1.1.2.2. Les évaluations paramétriques : indice de valeur culturale des sols	9
1.1.2.3. L'approche globale	11
1.2. LE CYCLE DE L'AZOTE	12
1.2.1. LE CYCLE INTERNE DE L'AZOTE	12
1.2.2. TRANSFORMATION DE L'AZOTE DANS LE SOL	12
1.2.2.1. Organisation et minéralisation	13
1.2.2.2. Ammonification et nitrification	15
1.2.2.3. Dénitrification	17
1.2.2.4. Volatilisation et lixiviation	17
1.2.3. ASSOCIATION DE L'AZOTE ORGANIQUE AVEC LES FRACTIONS MINÉRALES DU SOL	18
1.2.4. MÉTHODE DE FRACTIONNEMENT DE LA MATIÈRE ORGANIQUE	19
CHAPITRE II : DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE ET MÉTHODES ANALYTIQUES	22
2.1. DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE	22
2.2. MÉTHODES ANALYTIQUES	23
2.2.1. MÉTHODES CHIMIQUES	23
2.2.1.1. Dosage de l'azote minéral	23
2.2.1.2. Dosage de l'azote total	24
2.2.1.3. Fractionnement chimique des différentes formes d'azote	24
2.2.2. MÉTHODES ISOTOPIQUES	25
2.2.2.1. Dosage de l'azote 15	27
DEUXIÈME PARTIE : CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES POTENTIALITÉS AGRICOLES DES SOLS	
CHAPITRE III : CLASSIFICATION DES SOLS ET DÉTERMINATION DE LEURS POTENTIALITÉS (exemple des sols lorrains)	32
3.1. INTRODUCTION	32
3.2. LE MILIEU ET LES MÉTHODES	35

3.2.1. DESCRIPTION DES MILIEUX	35
3.2.2. LES METHODES	39
3.2.2.1. Prospection pédologique	39
3.2.2.2. L'examen des profils pédologiques	39
3.2.2.3. La classification des sols	40
3.3. CARACTERISATION ET CLASSIFICATION DES PRINCIPAUX SOLS DANS LES DEUX SECTEURS	44
3.3.1. CARACTERISATION DES PRINCIPAUX SOLS DES DEUX SECTEURS	50
3.3.1.1. Les sols du secteur de références du Barrois	50
3.3.1.2. Les sols du secteur de références des Vosges	54
3.3.2. CLASSIFICATION "NATURELLE" DES PRINCIPAUX SOLS DES DEUX SECTEURS	58
3.4. ESSAIS D'EVALUATION DES POTENTIALITES DES SOLS	62
3.4.1. L'EVALUATION DES APTITUDES AGRICOLES DES SOLS (SYSTEME AMERICAIN DE 8 CLASSES)	62
3.4.2. L'EVALUATION PARAMETRIQUE DE LA VALEUR CULTURALE DES SOLS (APPROCHE REGION CENTRE DE LA FRANCE)	66
3.4.3. L'EVALUATION GLOBALE DE LA POTENTIALITE AGRICOLE	71
3.4.4. DES SOLS (MESURE DES RENDEMENTS PONCTUELS) CONFRONTATION DES RESULTATS	75
3.5. ETUDE DES POTENTIALITES DES SOLS LORRAINS	78
3.6. CONCLUSIONS	87

TROISIEME PARTIE : DEVENIR DES FERTILISANTS AZOTES DANS DIFFERENTS SOLS CULTIVES EN MAIS

CHAPITRE IV : ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA TENEUR EN NITRATES DANS DIFFERENTS SOLS DES SECTEURS DU BARROIS ET DES VOSGES	91
4.1. INTRODUCTION	91
4.2. MATERIELS ET METHODES	92
4.2.1. LES SITES D'ETUDES	92
4.2.2. METHODOLOGIE	93
4.3. RESULTATS ET DISCUSSION	95
4.3.1. TENEUR EN AZOTE TOTAL	95
4.3.2. EVOLUTION DE LA TENEUR EN NITRATES	97
4.3.3. BILAN DE L'AZOTE	99
4.3.4. RISQUES D'ENTRAINEMENT DES NITRATES	103
4.4. CONCLUSIONS	110

CHAPITRE V : DETERMINATION DE L'EFFICIENCE D'UN FERTILISANT AZOTE (NH ₄ NO ₃) EN CONDITIONS DE PLEIN CHAMP DANS DES SOLS DE L'EST DE LA FRANCE ET DE LA REGION TROPICALE HUMIDE DU MEXIQUE	112
---	-----

5.1. INTRODUCTION	112
5.2. MATERIELS ET METHODES	114

5.2.1. LES SITES D'ETUDES	114
5.2.2. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX	115
5.2.3. VARIABLES MESUREES	124
5.2.4. METHODES ANALYTIQUES	125
5.2.5. ANALYSES STATISTIQUES	125
5.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS	126
5.3.1. RENDEMENTS EN FONCTION DES DOSES D'AZOTE	126
5.3.2. AZOTE PRELEVE PAR LES PARTIES AERIENNES DU MAÏS A LA RECOLTE	135
5.3.3. COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION DE L'ENGRAIS AZOTE (CAU)	139
5.3.4. COEFFICIENT REEL D'UTILISATION DE L'ENGRAIS AZOTE (CRU)	147
5.3.5. CALCUL DE LA VALEUR A DES SOLS ET DE L'ANI APPARENTE	157
5.3.6. RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTES VARIABLES MESUREES CONCERNANT L'AZOTE	168
5.3.7. AZOTE MINERAL DISPONIBLE DANS LE SOL	178
5.4. CONCLUSIONS	185
CHAPITRE VI : ETUDE DES MECANISMES D'ORGANISATION ET DE MINERALISATION DES COMPARTIMENTS ORGANIQUES AZOTES DANS HUIT SOLS EN PRESENCE D'UN FERTILISANT MINERAL MARQUE (K ¹⁵ NO ₃)	191
6.1. INTRODUCTION	191
6.2. MATERIELS ET METHODES	192
6.2.1. MATERIELS	192
6.2.2. METHODES	194
6.2.2.1. Protocole d'étude	194
6.2.2.2. Méthodes analytiques	195
6.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS	196
6.3.1 STATUT GENERAL DU ¹⁵ N APRES INCUBATION	196
6.3.1.1. Statut du N minéral après incubation	199
6.3.1.2. Organisation de l'azote engrais	205
6.3.2 STATUT DU ¹⁵ N APRES CULTURE DE RAY-GRASS	210
6.3.2.1. Origines de l'azote reminéralisé	210
6.3.2.2. Devenir de l'azote reminéralisé	217
6.4. CONCLUSIONS	222
CONCLUSIONS GÉNÉRALES	226
BIBLIOGRAPHIE	236
ANNEXES	253

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis la fin du siècle dernier l'homme a réalisé un difficile travail de reconnaissance et de diagnostic du sol comme ressource naturelle et aussi en fonction de ses relations avec les plantes cultivées. Ceci conduit d'une part à essayer de comprendre les facteurs et processus de formation des sols, et d'autre part à essayer de classer les différents sols répertoriés permettant ainsi d'extrapoler l'information générée à des sols similaires.

Du point de vue du pédologue l'utilité pratique des études pédologiques n'est pas remise en question : nous devons bien décrire et classer les sols et les agronomes pourront ensuite utiliser ces renseignements pour déterminer et/ou augmenter la potentialité agricole des sols. Ceci n'est pourtant pas si simple, puisque la transmission des informations entre ces deux professions ne se réalise pas très facilement. De ce fait la plupart des études de sols "dorment dans des tiroirs" après avoir servi à justifier un investissement économique ou une thèse. Bien que la plupart des caractéristiques utiles pour déterminer la potentialité agricole des sols figurent dans ces études, s'y retrouver dans cette grande quantité d'informations n'est pas aisé, surtout pour les agronomes ou biologistes non spécialisés en pédologie.

Les classifications techniques ou interprétatives des sols ont été créées pour rendre plus accessible cette démarche ; ainsi en fonction de l'utilité pratique qu'on envisage pour une certaine étude de sol : drainage, irrigation, préservation des ressources naturelles, construction ou aptitude générale à la production des cultures, nous pouvons faire appel à diverses classifications d'aptitudes des sols. Cette dernière approche a été essayée avec un certain succès pour des petites et moyennes échelles (1/1000000^e à 1/100000^e) ; mais pour des grandes échelles (1/50000^e à 1/5000^e) ou à l'échelle parcellaire, elle n'est pas très appropriée ; en effet, l'agronome chargé du développement agricole et qui doit faire face aux problèmes des agriculteurs, n'est pas en mesure de proposer des conseils pertinents à partir de cette approche, en particulier en matière de renseignements sur la fertilisation des cultures, car pour cela dans la plupart des cas il faut faire appel à des résultats d'investigations obtenus après plusieurs répétitions sur des sols similaires, lesquels peuvent cependant être repérés à l'aide des études de sols ; rappelons que les classes d'aptitude sont basées sur des caractères permanents des sols (parfois plus spécialement du

sous-sol) et les aspects liés à la fertilisation font appel principalement aux caractéristiques physico-chimiques de l'horizon de labour.

De ce fait quand on fait intervenir cette démarche pour une certaine culture nous constatons des problèmes pour déterminer la potentialité du sol ; en effet, la potentialité du sol dépendra du sol lui-même mais aussi des précédents cultureux, des variations climatiques dans le temps, des améliorations apportées au sol, de la situation économique, de la variation intra-parcellaire, etc. Il nous faut donc faire intervenir sur nos classes d'aptitudes ces variables liées à la potentialité agricole du sol pour une culture donnée et ceci pour un certain intervalle de temps et dans des parcelles représentatives d'une région socio-économique donnée.

Par ailleurs dans le domaine de la fertilisation azotée raisonnée en France, le principe du bilan prévisionnel de la fumure azotée a été mis en route depuis plusieurs années.

Dans ce principe du bilan il existe trois compartiments principaux :

- les besoins en azote de la culture (by) qui varient en fonction du type de culture et de la potentialité du sol

- les fournitures en azote du sol (fs) qui varient en fonction de la potentialité du sol mais aussi de l'année climatique, des précédents cultureux, etc.

- l'apport de l'azote engrais (X) qui doit combler la différence by-fs et qui dépendra du coefficient d'efficacité du fertilisant, celui-ci dépendant aussi des fs et du type de culture.

Il est donc évident que la connaissance de la potentialité des sols est déterminante pour bien calculer les apports d'engrais azoté, tant du point de vue économique qu'écologique. Néanmoins bien peu de recherches ont été mises en place pour essayer de relier la détermination de la potentialité des sols, l'utilisation de la fertilisation azotée raisonnée et les interactions entre les compartiments du bilan ; ces derniers étant liés aux flux de l'azote dans le cycle interne pour les différents types de sols.

Il existe donc un vide entre la définition des classes de potentialités des sols et les préconisations de fertilisation formulées par les agronomes ; ce vide peut être comblé en faisant intervenir le concept de rendement potentiel d'une certaine culture pour une

classé de sol donnée et pour une année climatique donnée avec un niveau de risque.

Nous proposons donc dans ce mémoire une démarche allant du général au particulier : de la définition de petites régions naturelles (études de secteurs de références) à l'étude des flux internes de l'azote engrais dans le sol, en passant par la définition de la potentialité pédo-climatique pour une certaine culture (le maïs).

PREMIERE PARTIE

**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE,
DEMARCHÉ EXPERIMENTALE ET
METHODES ANALYTIQUES**

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. POTENTIALITES DES SOLS

Le terme de potentialité sous-entend plusieurs notions qu'il convient de différencier. Les potentialités peuvent être abordées à différents niveaux en hiérarchisant les facteurs limitants. Sébillotte (1989), définit trois notions de potentialités ou aptitudes culturelles des milieux : tout d'abord le **Potentiel théorique (PT)** d'une culture défini comme la production maximale de matière sèche permise par la photosynthèse. Le seul facteur limitant est l'énergie lumineuse reçue. Ce potentiel suppose que la culture intercepte totalement le flux lumineux, qu'il n'y ait pas de périodes d'inoccupation du sol et que la température ne limite pas la croissance. Ces conditions n'étant pas réalisées, on définit alors une **potentialité culturelle (PC<PT)** ; dépendant de la succession de cultures et de la température. Cette notion spécifie des besoins potentiels en éléments minéraux, oxygène, eau,... qui doivent être satisfaits par le milieu, mais généralement ce milieu sera limitant pour ces facteurs et l'agriculteur s'efforcera de les corriger. On détermine alors une **potentialité agricole (PA<PC)** ; pour une surface donnée, un milieu donné et un système de culture donné ; compte-tenu des composants du milieu (autres que la température et la luminosité) et des corrections effectuées par l'agriculteur. Quand la potentialité d'un milieu est confrontée aux coûts qu'entraînerait l'extériorisation des potentialités et aux risques dans le choix et mise en oeuvre des systèmes de culture, on parle alors de l'aptitude culturelle d'un milieu. L'aptitude actuelle d'un terrain est celle qu'il présente au moment de son utilisation, c'est à dire compte-tenu des modifications qui lui ont déjà été apportées. L'aptitude potentielle est la nouvelle aptitude qu'il est susceptible d'acquérir après amélioration de certaines de ces caractéristiques (Marin-Laflèche, 1972).

L'objectif de la cartographie des sols est de fournir des informations qui peuvent servir comme base pour proposer un aménagement du territoire ou des programmes de conduite de la terre en harmonie avec la nature physique de l'environnement (Bartelli, 1978 ; Jamagne, 1979).

Par ailleurs, les systèmes de classification des sols dit "naturelles" ou taxonomiques ont été développés pour attribuer un nom à un certain type de sol en considérant les caractéristiques du sol lui-même, qui peuvent servir à identifier ce sol en correspondance aux facteurs génétiques ou morphologiques. Par contre les classifications techniques des sols ou classifications d'aptitude des sols ou encore évaluations des potentialités des sols, sont basées sur des critères pratiques "ad hoc" pour une certaine utilisation. La cartographie des sols et leur taxonomie doivent fournir les informations nécessaires pour les différents systèmes de classifications techniques des sols (Bartelli, 1978).

Brabant (1989) présente quelques règles de base pour faire une évaluation de la potentialité des terres :

1 - le concept "terre" est plus large que celui de "sol", car il englobe aussi le climat, la végétation et les activités humaines.

2 - Une évaluation des terres prend en compte non seulement la nature du sol, mais aussi son extension dans l'espace.

3 - Le type d'évaluation des terres dépend de l'échelle des cartes de sols.

4 - Il existe une équivalence entre, d'une part les unités de sols résultant de la cartographie, d'autre part les unités spatiales servant à l'évaluation des terres, et enfin les unités de terrain impliquées dans l'aménagement.

5 - La procédure d'évaluation comporte trois phases principales :

1^{ère} phase : détermination de l'aptitude ou de l'inaptitude

2^{ème} phase : détermination du degré d'aptitude

3^{ème} phase : classement des terres

6 - En général le pédologue se limite à une évaluation du milieu bio-physique. L'évaluation socio-économique est une autre activité complémentaire dans laquelle il peut participer, mais où interviennent des économistes, des agronomes, des socio-économistes...

L'établissement d'un jugement ou évaluation de la potentialité culturale d'un sol a toujours préoccupé l'homme ; cette évaluation peut être réalisée par trois méthodes principales :

- d'abord, celles qui procèdent de l'appréciation globale et qui intègrent tous les facteurs intervenant dans la valeur du sol, sans qu'il soit nécessaire de les décomposer.

- Ensuite, les méthodes qui procèdent d'une approche analytique et qui passent par l'examen de chacun des facteurs intervenant dans la valeur du sol.

- Finalement, les méthodes qui procèdent d'une approche mixte et qui passent par une confrontation entre des approches analytiques et des appréciations globales (Hallaire, 1981).

Dans les types d'évaluation analytique, la définition des caractéristiques pour la mise en valeur agricole des sols dépendra du type de production agricole (Bartelli, 1978), Ainsi un caractère d'un sol peut se comporter comme une contrainte majeure dans un système technique donné, et n'être qu'une contrainte mineure dans un autre (Boulaine, 1980). Sont considérées comme contraintes toutes les caractéristiques ou groupes de caractéristiques variables d'un type d'unité de terrain à un autre et on ne retient que les facteurs qui constituent une contrainte réelle et actuelle ; l'évaluation des divers types de caractéristiques et de leurs interactions n'est pas chose facile, il s'agit avant tout d'un problème de choix du nombre et des types de facteurs de contraintes (Sinaj, 1990).

1.1.2. QUELQUES EXEMPLES DE SYSTEME D'EVALUATION DES POTENTIALITES DES SOLS.

1.1.2.1. Les évaluations par inventaire et classement des contraintes.

Ce sont les méthodes qui cherchent parmi les caractéristiques pédologiques et du milieu celles qui s'opposent à la mise en valeur agricole ; une fois inventoriées ces contraintes sont classées suivant leur importance.

Le système d'évaluation des terres de la FAO.

Cette méthode a été définie à partir de six principes :

- L'aptitude d'une terre est évaluée en fonction de modes d'utilisation précis.
- L'évaluation demande la comparaison des résultats obtenus et des intrants nécessaires.
- Une approche multidisciplinaire s'impose.
- L'évaluation doit tenir compte des caractéristiques physiques, économiques et sociales du milieu.

- L'aptitude doit être déterminée sur la base d'une utilisation continue et non pas à courte échéance.

- L'évaluation nécessite de comparer plusieurs types d'utilisations.

Les différents critères sont groupés en caractéristiques de la terre et qualités de la terre. Les caractéristiques de la terre sont des propriétés que l'on peut mesurer ou évaluer et qui décrivent les unités cartographiques en associant normalement les sols et les facteurs du paysage. Les caractéristiques de la terre permettent de décrire avec précision les unités cartographiques et leur milieu environnant ; cependant, elles n'agissent pas directement sur le rendement et peuvent avoir des interactions entre elles. La FAO définit alors le concept de qualité de la terre comme un ensemble de propriétés d'une terre qui agit différemment sur l'aptitude d'une terre à un certain mode d'utilisation, autrement dit ce sont les interactions des facteurs du sol et du paysage affectant une certaine utilisation de la terre. Le système de groupement est nommé classification d'aptitude des terres et il reconnaît quatre catégories : ordre, classe, sous-classe et unité d'aptitude des terres. (FAO, 1976 et 1988 ; Bartelli, 1978 ; Delsert, 1993).

Système d'évaluation à la mise en valeur de la terre (système américain de huit classes).

Cette méthode a été développée pour le service de conservation des sols du département d'Agriculture des Etats-Unis (USDA) ; les sols sont groupés en classes, sous-classes et unités d'aptitudes de la terre avec le but de programmer la planification des exploitations agricoles (Klingebiel et Montgomery, 1961). Cette méthode a été reprise et améliorée par :

- l'Angleterre (Soil Survey of Great Britain, 1977 cité par Hallaire, 1981),

- la France notamment par l'INAPG permettant de nombreuses études régionales (Hallaire, 1981 cite entre autres : Lafrechoux, 1973 ; Leo, 1974 ; Edeline et Kriegl, 1977),

- le Mexique dont elle est utilisée en parallèle pour toutes les études de sols (Colegio de Postgraduados, 1977 ; I.M.T.A., 1988).

Le système est hiérarchique et place les unités cartographiques dans huit classes de capacité (sept dans les adaptations britannique

et française). Les risques et limitations d'utilisation des sols augmentent de la classe I à la classe VIII. Les classes I à IV sont considérées comme aptes pour la plupart des cultures ; les classes VI et VII peuvent être aptes pour les cultures, mais elles ont alors besoin de traitements spéciaux ou bien elles sont conseillées pour le pâturage ; la classe V n'entre pas dans cet ordre car elle est réservée aux sols trop humides ; finalement la classe VIII est réservée pour les utilisations non agricoles (aires de récréation, boisements, réserves de la vie sauvage, ...). Les sous-classes sont définies par le type de facteur limitant ou de risque ; cinq facteurs y sont reconnus : l'érosion, la topographie, le drainage, le climat et le sol (caractéristiques du profil). Les unités groupent les sols qui peuvent avoir la même réponse aux conduites culturales.

Le système de classification des sols d'après leur fertilité.

Ce système a été développé pour servir de liaison entre les sous-disciplines de la cartographie et de la fertilité des sols (Buol *et al.*, 1975) ; c'est une classification technique des sols issue d'une classification naturelle ou taxonomique, permettant de grouper les différents types de sols d'une façon quantitative (Sanchez *et al.*, 1982). Le système comporte trois niveaux : le type (texture de la couche superficielle du sol), le type de substrat (texture du sous-sol), et quinze facteurs discriminants basés sur différentes caractéristiques quantifiables du sol par rapport à sa fertilité (présence de gley, régime hydrique du sol, toxicité aluminique, acidité, C.E.C., fixation du phosphore, présence de minéraux amorphes, sodicité,...). Remarquons qu'il ne prend pas en compte de caractéristiques liées aux limitations du sol à fournir l'azote. La combinaison de ces trois niveaux donne les unités de ce système, lesquelles ne sont pas hiérarchisées ; des préconisations de fertilisation sont données pour chaque unité du système (Sanchez *et al.*, 1982).

1.1.2.2. Les évaluations paramétriques : indice de valeur culturelle des sols.

L'idée est venue à plusieurs auteurs de chiffrer les résultats obtenus par le classement des contraintes (Boulaine, 1980). Puisque les facteurs influant sur la valeur de la terre sont examinés individuellement ; il est tentant de donner à chacun d'eux une note, puis de combiner ces notes en un indice final représentatif de la valeur du sol (Hallaire, 1981).

La notation de ces facteurs se fait de plusieurs façons suivant leur nature :

- les facteurs directement mesurables (pente, profondeur, pierrosité,...) sont les plus faciles à noter ; il suffit de leur attribuer une note proportionnelle à la grandeur si le facteur est favorable ou inversement proportionnelle si le facteur est défavorable.

- les facteurs non mesurables, mais ordonnables (par exemple le degré d'hydromorphie), peuvent être notés par cette seconde méthode de type discontinu.

- les facteurs descriptifs (texture, type de profil,...) sont les plus difficiles à noter, c'est à l'utilisateur de définir des catégories et de classer suivant la gêne qu'elles représentent pour la mise en valeur et d'affecter à chacune une note en relation avec leur valeur supposée (Hallaire, 1981 ; Sinaj, 1990).

Pour combiner ces notes en une seule , c'est-à-dire "relativiser le vecteur critère", deux attitudes peuvent être prises :

- la relation additive : l'indice du sol est la somme des notes des différents facteurs ;

- la relation multiplicative : l'indice du sol est le produit de notes (comprises entre 0 et 1) de ses différents facteurs (Marin-Laflèche, 1972).

Sinaj (1990) citant Riquier (1972), mentionne une autre approche ; il s'agit d'une méthode complexe aux formules compliquées ; cette approche est certainement préférable mais sa mise au point est délicate. Les formules établissent des fonctions mathématiques de paramètres par rapport aux caractères ; cette méthode nécessite un réseau expérimental lourd de petites parcelles permettant d'établir des modèles de prévision des rendements pour les différentes cultures.

Méthodes additives.

Cette méthode longuement explicitée par Duclos (1971), a ensuite été utilisée par l'INRA (1976) pour l'étude des sols de l'Oise ; les facteurs utilisés sont : pente, profondeur, texture, réserve utile en eau, fertilité potentielle, excès d'eau, pierrosité, calcaire actif et substratum ; ces chercheurs établissent une hiérarchie des facteurs et distinguent sept classes de sols en faisant des intervalles de 10 points ; le meilleur sol obtiendra 70 points.

Lafrechoux *et al.*, (1983) utilisent une méthode similaire pour le classement des sols de la Région Centre de la France. Sept facteurs hiérarchisés sont pris en compte : la texture, l'hydromorphie, la profondeur du sol, l'état calcique et organique de la surface, la réserve utile en eau, la pierrosité et la teneur en carbonates ; le meilleur sol doit atteindre 100 points ; finalement ces auteurs établissent un classement arbitraire des sols en quatre classes : classe A (80-100 points), classe B (60-79 points), classe C (40-59 points) et classe D (<40 points).

Méthodes multiplicatives.

La méthode multiplicative la plus connue dans le monde est sans doute, l'indice établi par Storie (1976), qui a été repris par les pédologues de la FAO (Riquier, 1971) pour définir un index de potentialité :

$$Y=100C \times Y_p \times Y_s \times Y_v \times Y_o \times Y_e.$$

dont Y est le rendement en % du maximum génétique possible dans les meilleures conditions (100 C) et $Y_p, Y_s, Y_v, Y_o, Y_e...$ sont les rendements en % en fonction de chacun des critères diagnostiques (profondeur, saturation en bases, matière organique,...). On établit cinq classes de productivité hiérarchiques. (Hallaire, 1981 ; Sinaj, 1990).

1.1.2.3. L'approche globale.

L'expression la plus utile de la productivité du sol est le rendement de la culture (Bartelli, 1978) ; cependant c'est une approche difficile à mettre en place du fait de la variabilité des systèmes culturaux et des sols. De plus la productivité du sol pour une culture ne refléterait que partiellement la "valeur du sol", le choix de la ou des cultures de référence est assujetti à la région et à l'époque. Il faut plutôt envisager des approches mixtes entre évaluations analytique et globale pour mieux cerner les facteurs limitants d'un milieu et le classement de ses potentialités (Hallaire, 1981).

1.2. LE CYCLE DE L'AZOTE

L'azote est un élément nutritif essentiel à la croissance des plantes ; dès le XIX^e siècle, les élèves d'Antoine Laurent de Lavoisier ont montré qu'il représente 2 à 6% de la matière sèche des organismes végétaux (Meyer *et al.*, 1993). Seulement 2% de l'azote présent sur le globe se trouvent recyclés en permanence dans la biosphère et constituent par conséquent la source essentielle du cycle biogéochimique. Le reste (98%) se trouve majoritairement dans les roches volcaniques et sédimentaires (Wayne, 1993).

1.2.1. LE CYCLE INTERNE DE L'AZOTE.

L'azote est présent dans le sol sous deux formes : organique et minérale. L'azote contenu dans les sols cultivés est essentiellement sous forme organique (environ 95%), dépendant de l'intensité de la conduite culturale (Wetselaar et Ganry, 1982). La proportion restante est constituée par des formes minérales, principalement les ions NO_3^- et NH_4^+ ; ces formes sont significativement plus élevées dans les sols agricoles avec des itinéraires techniques intensifs (Vinten et Smith, 1993).

Les divers transferts entre les formes minérales et organiques dans le système sol-plante sont impliqués dans le cycle interne de l'azote. Son importance a amené de nombreux chercheurs à proposer des schémas de synthèse de ces transferts (Jansson, 1958 ; Bonneau et Souchier, 1979 ; Guiraud, 1984 ; Bøckman *et al.*, 1990). Pour notre étude nous nous sommes inspirés du schéma de Guiraud (1984) qui est une représentation assez simplifiée de ce réseau complexe de réactions. Il privilégie les aspects relatifs au processus d'organisation-reminéralisation, d'absorption par les plantes, et de pertes par lixiviation et par voie gazeuse (fig 1.1).

1.2.2. TRANSFORMATIONS DE L'AZOTE DANS LE SOL.

Dans le sol l'azote peut subir de multiples réactions, dont les principales sont : organisation et minéralisation ; ammonification et nitrification ; dénitrification ; volatilisation et lixiviation.

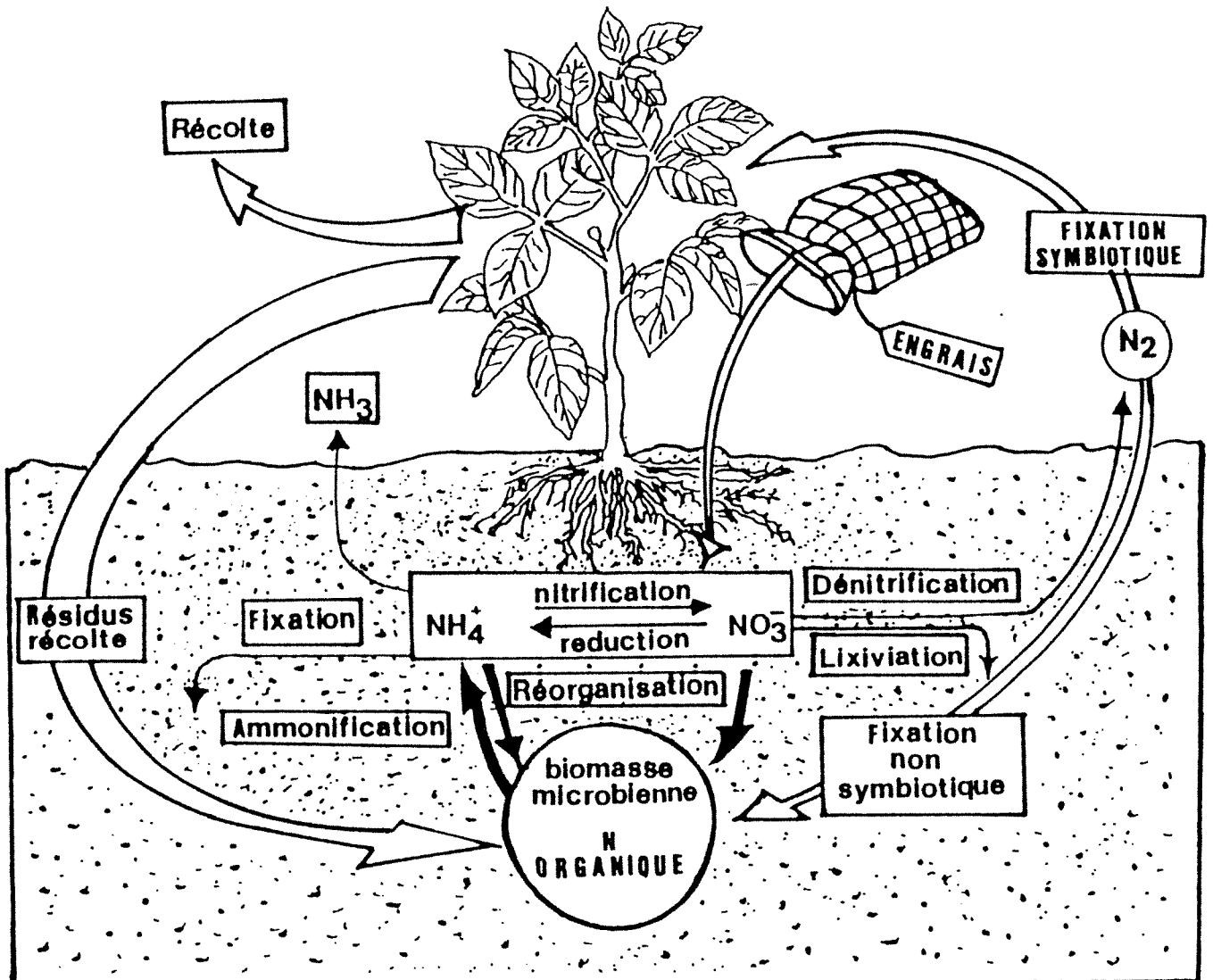


Fig 1.1 : cycle de l'azote (d'après Guiraud, 1984)

1.2.2.1. Organisation et minéralisation

L'organisation

L'organisation est définie comme la transformation biologique de l'azote inorganique en azote organique par voie microbienne dans le sol. Les microorganismes du sol assimilent ces formes inorganiques d'azote pour former des composés organiques qui constituent leurs cellules et tissus. Grâce à l'utilisation du marquage

isotopique des fertilisants, tant minéraux qu'organiques, nous pouvons mieux cerner les mécanismes d'organisation de l'azote. Les essais au champ et au laboratoire ont montré qu'une partie non négligeable de l'azote engrais (20 à 50%) se retrouve organisée essentiellement par voie microbienne (Rémy et Hébert, 1977 ; Guiraud, 1987 ; Recous, 1988 ; Sulce, 1993). Il est prouvé que la nature ionique des fertilisants intervient sur le potentiel d'organisation ; en effet, il a été constaté une organisation plus importante d'un fertilisant ammoniacal par rapport à la forme nitrique (Wickramasinghe *et al.*, 1985 ; Recous *et al.*, 1992 ; Azam *et al.*, 1993).

D'autre part l'intensité d'organisation varie selon le rapport C/N de la matière organique (Jacquin et Vong, 1990). Par ailleurs, le fractionnement hydrolytique des composés organiques azotés met en évidence une organisation de ^{15}N dans toutes les fractions, mais majoritairement dans la fraction des acides aminés (Guiraud et Marol, 1982 ; Vong, 1987 ; Chéloufi, 1991 ; Sulce, 1993 ; Alfaia, 1993). Enfin l'intensité d'organisation varie aussi avec les apports de substrats organiques (Jacquin et Vong, 1990), les températures (Nicolardot *et al.*, 1994), les teneurs en azote et l'acidité des sols (Alfaia, 1993 ; Coûteaux et Sallih, 1994).

La minéralisation

La minéralisation est définie comme la transformation biologique de l'azote organique en azote inorganique (NH_4^+ et NO_3^-). L'agent essentiel de ce processus est la micropopulation hétérotrophe du sol qui utilise les composés organiques azotés comme source d'énergie ; l'azote en excès par rapport aux besoins des microorganismes est libéré sous forme inorganique (Jansson et Persson, 1982). La minéralisation consiste en trois étapes : amination ou transformation des protéines en amino acides ; ammonification, ou transformation des amino acides en ammonium ; et nitrification ou transformation de l'ammonium en nitrate, avec une étape intermédiaire, la nitrification ou formation de nitrite (Duchaufour, 1991).

On considère la minéralisation de l'azote comme un phénomène microbien régi par les conditions du milieu ; en effet, la minéralisation est notamment liée aux teneurs en carbone et azote de

la matière organique, aux teneurs en carbonates, à la température et à l'humidité du sol, au fer total et libre, aux teneurs en argile et au pH (Delphin, 1981 ; Chaussod *et al.*, 1986 ; Morel, 1989 ; Jacquin *et al.*, 1991 ; McTaggart et Smith, 1993 ; Nicolardot et Molina, 1994).

Bremner (1967) estimait la quantité d'azote minéralisé chaque année à partir de la matière organique du sol à de l'ordre de 1 à 3% de l'azote total. D'autre part il est couramment admis que l'azote récemment organisé dans un pool labile est plus facilement minéralisable (Guiraud et Boniface, 1987 ; Jacquin *et al.*, 1991). Les amino acides représentent le siège principal de la minéralisation-organisation (Kai, 1985) ; de ce fait la quantité la plus importante de l'azote reminéralisé provient de la fraction des acides aminés (Guiraud, 1984 ; Vong, 1987 ; Chéloufi, 1991 ; Sulce, 1993).

En outre de nombreux travaux ont été effectués pour mettre en relation des indices d'extraction chimique et l'azote minéralisable du sol ; ces travaux ont permis d'obtenir des corrélations significatives entre ces indices (Stanford et Smith, 1972 ; Guerrero *et al.*, 1990 ; Sulce, 1993 ; McTaggart et Smith, 1993).

1.2.2.2. Ammonification et nitrification

Ammonification

L'ammonification est le résultat de la première transformation dans le sol de l'azote organique. C'est une forme transitoire, rapidement transformée en azote nitrique. Dans les sols cultivés, habituellement éloignés des pH extrêmes, la nitrification est plus rapide que la libération d'ion ammonium par minéralisation ; il en résulte une teneur très faible en ions ammonium, souvent difficilement décelable par voie analytique (Morel, 1989).

Les plantes cultivées absorbent essentiellement l'azote minéral pour leur nutrition, et préférentiellement l'azote nitrique. Dans un sol fortement acide, où il y a inhibition de la nitrification, NH_4^+ peut être une importante source d'azote pour les plantes. En effet, quelques plantes adaptées aux conditions de sol acide peuvent mieux se développer en présence de NH_4^+ que de NO_3^- (Foy et Fleming, 1978).

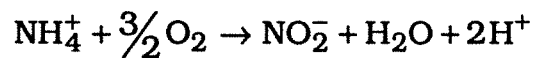
Les devenir possibles de l'ammonium libéré dans le sol sont les suivants : absorption par les plantes et microorganismes ;

transformation en nitrate ; adsorption soit sur les particules d'argiles kaolinitiques et il reste alors disponible pour les plantes, soit sur les argiles de type 2:1, il devient alors peu soluble et non échangeable.

Nitrification

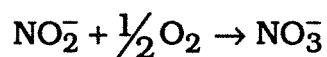
La nitrification est un phénomène d'oxydation microbiologique par lequel la forme ammoniacale de l'azote est transformée en forme nitrique. Elle est une étape complémentaire des processus de minéralisation et concerne également la transformation des engrais ammoniacaux.

La réaction d'oxydation de NH_4^+ en NO_2^- ou nitritation, s'écrit



Cette oxydation est réalisée par les bactéries du genre *Nitrosomonas*. L'énergie dégagée par cette réaction est utilisée pour la croissance microbienne.

L'oxydation du nitrite en NO_3^- est réalisée par les bactéries *Nitrobacter*, et la réaction s'écrit

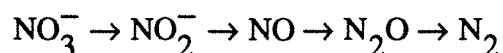


Ces deux groupes de microorganismes sont plus sensibles à un faible pH que ceux responsables de la minéralisation. Dans le sol, le maximum d'activité des nitrificateurs se situe au voisinage de la neutralité (pH 7). Aussi la nitrification dans les sol acides est-elle favorisée par le chaulage (Morel, 1989).

Les nitrates disponibles dans le sol peuvent être assimilés par les plantes, puisque la plupart des plantes cultivées absorbent préférentiellement l'azote nitrique. Ils peuvent être perdus par dénitrification dans les sols faiblement aérés, ou par lixiviation, car ce phénomène concerne presque uniquement l'ion nitrate. Ils peuvent également être réorganisés par la microflore, bien que les microorganismes hétérotrophes semblent préférer l'ion ammonium (Wickramasinghe *et al.*, 1985 ; Machet *et al.*, 1987).

1.2.2.3. Dénitrification

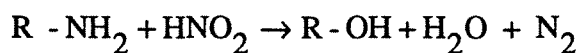
La dénitrification est la réaction de réduction des nitrates en oxydes d'azote et en azote gazeux. La réaction est la suivante :



Certaines bactéries utilisent les nitrates comme source d'oxygène quand les teneurs en oxygène de l'atmosphère du sol sont limitatives (anaérobiose) : l'absence d'oxygène est donc le facteur déterminant de ces réactions. Ce phénomène conduit à une perte d'azote fâcheuse au plan de la nutrition azotée des cultures. La question qui se pose est celle de l'ampleur de cette perte, la réponse demeurant fort imprécise (Morel, 1989 ; Vinten et Smith, 1993).

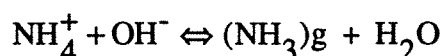
Le taux de dénitrification est plus lent dans les sols acides (<pH 5) que dans les sols proches de la neutralité (>pH 6). Le pH optimum se situant entre 7,0 à 7,5, probablement à cause de l'effet du faible pH sur le développement des bactéries dénitrifiantes.

La dénitrification peut également présenter un aspect chimique, d'importance mineure. La réaction s'écrit alors :



1.2.2.4 Volatilisation et lixiviation

La volatilisation consiste dans un départ d'ammoniac (NH_3) vers l'atmosphère, essentiellement à partir du sol, et parfois de la plante. Le facteur essentiel influençant ce phénomène est le pH de la solution du sol car il affecte l'équilibre représenté dans la réaction suivante :



La réaction montre que la volatilisation augmente avec le pH. Il n'y a pas unanimité dans la littérature au sujet du pH critique à partir duquel les pertes deviennent significatives. Gardmer (1965) par exemple rapporte que les pertes de NH_3 au-dessous de pH 7 sont

négligeables. Mais d'autres facteurs influencent ce phénomène, comme la température de la solution du sol, l'humidité, la capacité d'échange.

Le phénomène de lixiviation de l'azote concerne presque uniquement l'ion nitrate, qui est un anion peu retenu par le complexe organo-minéral du sol.

La quantité de nitrates présente dans le profil du sol et qui peut être lixiviée dépend de plusieurs facteurs tels que : la quantité et la forme d'engrais apportés ; le taux de minéralisation de l'azote du sol ; le régime hydrique drainant ; les caractéristiques du sol (pH, matière organique, texture, structure, C/N) et du climat (pluviosité) ; le type d'utilisation de la terre (Vinten et Smith, 1993).

Les études réalisées tant en France qu'à l'étranger montrent des accroissements réguliers des teneurs en nitrates des eaux souterraines et des eaux de surface. Les niveaux de fertilisation minérale (engrais) et organique (lisiers) sont considérés comme étant les pratiques agricoles les plus polluantes des aquifères dans une agriculture intensive (Hénin, 1981 ; Sébillotte et Meynard, 1990). Ces résultats montrent incontestablement l'influence des pratiques agricoles sur l'augmentation croissante des concentrations en nitrates des eaux souterraines ce dernier demi-siècle.

1.2.3. ASSOCIATION DE L'AZOTE ORGANIQUE AVEC LES FRACTIONS MINÉRALES DU SOL

D'après Persson (1981) l'établissement de liaisons entre les composés humiques riches en azote et les argiles par l'intermédiaire des oxydes de fer s'effectue rapidement et ceci n'entraîne pas un ralentissement du turnover de l'azote. Par ailleurs Andreux et Jocteur-Monrozier (1981) ont montré que l'absorption de substrats biodégradables tels que les amino-acides sur une phase minérale peut entraîner un ralentissement de la minéralisation.

Selon Dachman et Stotsky (1982), le taux des amino-acides pouvant être absorbés ou former des liaisons avec les argiles, est dépendant :

- du type d'amino-acides
- du type d'argile
- de la nature du cation prédominant sur les argiles
- de la basicité et de la nature des groupements fonctionnels additionnés aux amino-acides.

En ce qui concerne la répartition de l'azote en fonction des fractions granulométriques du sol, les techniques utilisées associent souvent des procédés physiques (ultrasonification, dispersion, tamisage, sédimentation) à des procédés chimiques (extraction par des réactifs alcalins, hydrolyse acide). La majeure partie de la matière organique est liée aux fractions fines. La fraction du sable grossier renferme essentiellement une matière organique non humifiée (Adams, 1982 ; Egoumenides *et al.*, 1990). D'après des protocoles expérimentaux de plein champ menés sur deux dispositifs de longue durée, la fraction d'argile grossière renferme la partie stable de la matière organique, la fraction de limon fin une partie moyennement stable et la fraction d'argile fine une matière organique labile (Balesdent et Mariotti, 1987 ; Feller *et al.*, 1991). D'après Christensen (1985), le mode d'utilisation du sol influence la répartition granulométrique de la matière organique. La présence d'un système cultural semble jouer un rôle prépondérant par rapport au mode de fertilisation. En l'absence de plante, l'appauvrissement de la fraction argile fine est plus prononcé. La matière organique de cette fraction serait donc liée à la présence des plantes et plus particulièrement à l'exsudation dans le milieu de composés organiques facilement dégradables.

I.2.4. METHODE DE FRACTIONNEMENT DE LA MATIERE ORGANIQUE

Pour caractériser les dérivés azotés dans le sol, trois techniques sont couramment utilisées : l'extraction alcaline (Duchaufour et Jacquin, 1966), l'hydrolyse acide (Bremner, 1965 ; Vong *et al.*, 1981 ; Guiraud, 1984) et le fractionnement physique des agrégats

suivi ou non par des extractions chimiques (Bruckert, 1979 ; Cortez et Hameed, 1992).

Nous nous sommes intéressés à l'hydrolyse acide, une technique assez simple permettant de fractionner les protéines. On utilise exclusivement l'acide chlorhydrique 6N qui est un azéotrope facilement éliminé en fin d'opération. L'hydrolyse acide, technique dégradative, se montre beaucoup plus efficace que l'extraction alcaline pour la solubilisation préférentielle des composés organiques azotés des sols. Elle permet d'obtenir, à partir de macromolécules des composés plus simples, et donc plus facilement identifiables.

Les amino-acides

Dans le sol, sous différents climats, l'azote hydrolysable total représente environ 80% de l'azote total. Cette forme est constituée principalement d'acides aminés (38 à 51%) qui ont pour origine principale des synthèses microbiennes produites au cours de la décomposition des substrats organiques (Schnitzer, 1981). Une autre partie, moindre, pourrait correspondre aux métabolites ou à des produits lytiques adsorbés sur les argiles.

Les hexosamines

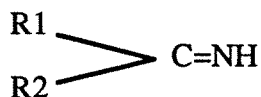
Leurs taux par rapport à l'azote total des sols se situent entre 5 et 10% (Bremner, 1967). Au cours de l'hydrolyse acide (HCl 6N) on note une perte de l'azote pas désamination si bien que le dosage des hexosamines nécessite un facteur de correction. Les travaux de Bremner (1958), montrent que les sucres aminés présents dans les sols sont constitués de glucosamine et de galactosamine. Leur origine est essentiellement microbienne, car ils rentrent dans la constitution des polysaccharides des bactéries, des actinomycètes des mollusques et dans celle de la chitine des champignons.

Azote ammoniacal libéré par hydrolyse acide

L'azote ammoniacal représente jusqu'à 50% de l'azote fulvique, mais n'excède pas 20% dans le cas des acides humiques. Selon Schnitzer (1981) cette forme représente entre 18 et 32% de l'azote total, ce qui constitue par conséquent un pourcentage plus faible comparé aux aminoacides. La moitié de l'azote ammoniacal libéré

provient des amides tels que l'asparagine et la glutamine (Kickhuth et Sheffer, 1976). L'autre moitié a pour origine les "pseudo-amides" qui d'après Schnitzer (1981) ont les structures suivantes :

- des groupements imino attachés aux noyaux quinoniques
- des bases de Schiff :



- des structures d'énamine : $\text{R} - \text{C} = \text{H} - \text{NH}_2$

Une autre source d'ammoniaque est issue du processus de désamination des amides et des amino-sucres. Et enfin une partie non négligeable provient des ions NH_4^+ fixés par les argiles.

Forme de l'azote hydrolysable non identifié

Cette forme, obtenue par différence entre l'azote hydrolysable total et la somme des autres formes azotées, peut atteindre 30% de l'azote total (Bremner, 1967). L'étude des acides humiques des sédiments marins a montré que le pourcentage d'azote non identifié est d'autant plus élevé que l'azote total est sensible à l'hydrolyse. Selon Andreux et Jocteur-Monrozier (1981) les composés non identifiés se concentrent principalement dans les hydrolysats des acides fulviques et plus particulièrement dans les acides humiques.

Azote non hydrolysable

C'est une fraction résistante à la biodégradation, très stable et sans doute très hétérogène : polycondensat aromatique des acides humiques et de l'humine, et qui constitue certainement les fractions les plus anciennes des substances humiques du sol. D'après Haider *et al.* (1965), majoritairement l'azote non hydrolysable correspond aux groupements phénylaminés et phénylamino-acides du noyau et une faible partie est hétérocyclique.

Schnitzer et Hindle (1980) ont prouvé qu'après oxydation chimique avec l'acide peracétique, une proportion notable de cet azote se libère sous forme gazeuse. Les travaux ont conduit à conclure que la nature de cette fraction d'azote est partiellement non protéique.

CHAPITRE II : DEMARCHE EXPERIMENTALE ET METHODES ANALYTIQUES

2.1. DEMARCHE EXPERIMENTALE

Après cette étude bibliographique restreinte, nous nous sommes posés plusieurs questions concernant la potentialité des sols et sa relation avec la fertilisation azotée : est-il possible d'utiliser les études de sols à grande échelle comme base pour établir un jugement sur la potentialité des sols d'une région donnée ? Ce jugement est-il relativement constant dans le temps et pour les différentes cultures ? Cette potentialité du sol est-elle liée aux facteurs conditionnant l'efficacité et le devenir de la fertilisation azotée pour une culture donnée ? Le risque écologique d'entraînement des nitrates est-il déterminé par la potentialité du sol donc par la fertilisation azotée ? Enfin, les processus du cycle interne de l'azote dans les sols, comme critères biochimiques, sont-ils en relation avec les paramètres physico-chimiques permettant de classer la potentialité des sols ?

Pour donner des éléments de réponse, ou peut être pour élargir nos questions, nous avons adopté les démarches suivantes :

a) Utilisant les études agro-pédologiques effectuées dans deux secteurs de références en région Lorraine (le Barrois et les Vosges), nous avons classé les principaux sols au moyen de deux classifications pour la mise en valeur de l'aptitude culturale des sols (méthode américaine de huit classes et approche paramétrique de la région Centre de la France) ; de plus, nous avons mesuré les rendements obtenus pour diverses cultures et pendant trois campagnes agricoles consécutives. Cette méthodologie a pour objectif de comparer les paramètres physico-chimiques permanents des sols avec leur potentialité agricole et ceci pour diverses années climatiques et types de sols.

b) Pour les différents sols répertoriés nous avons suivi la cinétique des nitrates, ainsi que les teneurs en N total des sols sous culture de maïs, avec comme objectif de comparer les classes de potentialité des sols face à un risque écologique : l'entraînement des nitrates.

c) A l'aide du ^{15}N comme traceur, nous avons établi des essais de fertilisation azotée sur le terrain pour quatre types de sols en Lorraine, deux types de sols en Alsace et deux types de sols dans la région tropicale humide du Mexique ; les essais français ont été répétés deux années consécutives. Nous avons établi pour les différents types de sols des classes de potentialité et avons mesuré sur les essais : les rendements, le prélèvement d'azote par le maïs, les coefficients réels et apparents d'utilisation du fertilisant azoté (NH_4NO_3), le stock d'azote disponible dans le sol (valeur A des sols), les interactions entre l'azote engrais et l'azote endogène du sol (effet ANI) et les relations entre les variables concernant le cycle interne de l'azote. Ceci nous a permis de comparer les facteurs affectant l'efficacité de la fertilisation azotée du maïs avec les caractéristiques des différents types de sols étudiés.

d) Puisque la nature bio-physico-chimique du sol joue un rôle important dans les processus internes d'organisation-reminéralisation des engrais azotés, nous avons mené sous conditions contrôlées au laboratoire et en présence de K^{15}NO_3 , une expérience visant à déterminer après un mois d'incubation les processus d'organisation-minéralisation dans les huit sols étudiés en conditions de plein champ. D'autre part, la mise en culture de ces sols après élimination de l'azote minéral nous a permis de quantifier la reminéralisation du ^{15}N récemment organisé et déterminer son origine.

2.2. METHODES ANALYTIQUES

2.2.1. METHODES CHIMIQUES

2.2.1.1. Dosage de l'azote minéral

* Azote non marqué : sur les extraits de sol frais après extraction par KCl 1M, les formes d'azote ammoniacal et nitrique ont été dosées par colorimétrie en flux continu à l'aide d'un autoanalyseur "Technicon". Les nitrates sont réduits par une solution de sulfate d'hydrazine à 37°C en présence de sulfate de cuivre comme catalyseur. Le dosage de l'ammonium repose sur la formation

d'un complexe coloré entre l'ion ammonium, le salicylate de sodium et le chlore en milieu alcalin. Les résultats obtenus sont reproductibles avec un coefficient de variation inférieur à 0,5% pour une concentration de 3 mg N litre⁻¹.

* Azote marqué : le dosage a été effectué selon la méthode classique d'extraction avec KCl 1N suivie d'une distillation en présence de MgO pour déplacer les ions NH₄⁺ et d'alliage de DEVARDA pour réduire les ions NO₂⁻ et NO₃⁻ (Bremner, 1965).

2.2..1.2. Dosage de l'azote total

L'azote total a été dosé par la méthode Kjeldahl-Olsen (Guiraud et Fardeau, 1977a) qui consiste à transformer par une attaque sulfurique à chaud (après réduction des nitrates) toutes les formes d'azote en sulfate d'ammonium. Une distillation en milieu basique permet l'entraînement par la vapeur de l'ammoniaque dans une solution d'acide sulfurique N/10. Par un dosage en retour, en présence de soude N/10, la quantité d'azote contenue dans l'échantillon est déterminée.

2.2.1.3. Fractionnement chimique des différentes formes d'azote

La méthode utilisée correspond à une technique simplifiée du processus proposé par Stewart *et al.*, (1963). L'équivalent de 10 g de sol sec (après l'extraction de l'azote minéral avec KCl 1N) est hydrolysé sous reflux avec 100 ml de HCl 6N pendant 16 heures (Bremner, 1965). Après refroidissement, le mélange est filtré sur filtre de cellulose ; le résidu est rincé à l'eau distillée et les eaux de rinçage s'ajoutent au filtrat qu'on ajuste au volume final de 200 ml. On dispose alors de la solution contenant l'azote hydrolysable total et du résidu qui est séché à l'air.

Par distillation directe d'une aliquote du filtrat (20 ml) en présence de NaOH 10N et piégeage dans H₂SO₄ 0,01N on obtient, après titrimétrie par NaOH 0,01N, la fraction soluble dans l'acide et distillable dénommée NSAD.

Par minéralisation d'une aliquote de l'hydrolysate acide (20 ml) selon une adaptation de la méthode Kjeldahl-Olsen (Guiraud et Fardeau, 1977a), on obtient l'azote hydrolysable total (NHT).

Quant à la fraction dite soluble dans l'acide et non distillable ou NSAnD, elle correspond à la différence entre l'azote hydrolysable total et le NSAD.

L'azote non hydrolysable (NnH) et l'azote total, sont obtenus par minéralisation selon la même méthode que celle utilisée pour l'azote hydrolysable total.

2.2.2. METHODES ISOTOPIQUES

Nous rappelons que trois hypothèses fondamentales sont nécessaires pour l'utilisation de ^{15}N comme traceur (Hauck et Bremner, 1976) :

1) les éléments ont, à l'état naturel, une composition chimique constante

2) les organismes vivants ne peuvent distinguer un isotope d'un autre qu'avec difficulté

3) les propriétés chimiques des isotopes sont conservées dans les systèmes biologiques.

Avant de décrire les méthodes isotopiques utilisées dans ce mémoire, il est nécessaire de rappeler les principales définitions introduites par l'utilisation de l'isotope ^{15}N . Ces définitions sont utilisées en permanence quand on manipule des composés marqués, plus particulièrement dans les essais agronomiques.

-Abondance isotopique (A%) : grandeur sans dimension, qui est le rapport en pourcentage de l'isotope à l'ensemble des isotopes du même élément.

$$\text{Pour l'azote : } A\% = \frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N} + ^{15}\text{N}} \times 100$$

La même grandeur est parfois désignée "teneur isotopique".

Excès isotopique (E%) : c'est la différence entre l'abondance isotopique de l'échantillon et celle d'un étalon de référence. Pour l'azote, l'étalon de référence est l'air dont l'abondance isotopique (abondance isotopique naturelle) est : 0,366%.

$$E\% = A\% - 0,366$$

Coefficient Réel d'Utilisation (CRU%) : c'est le pourcentage d'azote de la plante provenant de l'engrais par rapport à la quantité d'azote 15 apportée par l'engrais.

$$\text{CRU}\% = \frac{N_x \times E}{X \times E_o} \times 100$$

N_x : Quantité totale d'azote dans la plante

X : Quantité totale d'azote de l'engrais ajouté

E et E_o : Excès isotopiques respectifs de la plante et de l'engrais (Comifer, 1993)

Nitrogen derived from fertilizer (Ndff%) : C'est le pourcentage d'azote de la plante provenant de l'engrais ajouté :

$$\text{Ndff}\% = \frac{E}{E_o} \times 100$$

Méthode isotopique de quantification du pool d'azote du sol (valeur A) : le concept de la valeur A proposé par Fried et Dean (1952) repose sur l'hypothèse suivante : lorsqu'une plante est en présence de différentes sources d'azote, la mobilisation à partir de chacune de ces sources est proportionnelle à la quantité disponible dans ces différentes sources, d'où l'équation de base :

$$\frac{N \text{ total}}{N \text{ total disponible}} = \frac{N_{dff}}{NF} = \frac{N_{dfs}}{A \text{ sol}}$$

où les termes :

$N \text{ total disponible} = NF + A \text{ sol}$

NF = azote engrais apporté

$A \text{ sol}$ = azote sol disponible (pool d'azote mobilisable)

La valeur A mesure le pool d'azote du sol en équivalent engrais, par exemple en kgN/ha équivalent sulfate d'ammonium, si cet engrais est l'engrais utilisé pour la mesure (Ganry, 1990).

La quantité d'azote disponible dans la source "sol" est désignée par A. Pour la détermination de cet azote, il est nécessaire de connaître :

$N \text{ total}$

$N_{dff} = N \text{ total} \times fN_{dff}$

$N_{dfs} = N \text{ total} \times fN_{dfs}$

où les termes :

fNdff = fraction N provenant de l'engrais (*fraction N derived from fertilizer*)

fNdfs = fraction N provenant du sol (*fraction N derived from soil*)

vérifient l'égalité suivante :

$$fNdff + fNdfs = 1$$

Ces équations permettent d'écrire les deux relations suivantes :

$$\frac{fNdff}{NF} = \frac{fNdfs}{A \text{ sol}} = \frac{1 - fNdff}{A \text{ sol}}$$

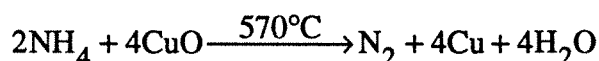
De cette relation, on déduit la valeur A du sol :

$$A \text{ sol} = NF \left(\frac{1 - fNdff}{fNdff} \right)$$

2.2.2.1. Dosage de l'azote 15

Spectrométrie optique

Les dosages isotopiques par spectrométrie optique ont été effectués après conversion de l'azote ammoniacal en N₂ par la méthode de DUMAS (Fiedler et Proksch, 1975 ; Martin *et al.*, 1981).



Après distillation, l'échantillon d'ammoniaque est recueilli dans une solution titrée de H₂SO₄. Après titration, le distillat est acidifié et évaporé sur plaque chauffante à 70°C dans une atmosphère dépourvue de toute trace de NH₃.

Les échantillons sont ensuite dilués, puis prélevés par capillarité dans un tube de verre (1,0 mm de diamètre interne) dont le volume est calculé de façon à obtenir une solution contenant 3 à 4 µg d'azote pour 10 µl. Les capillaires sont séchés à l'étuve à 70°C. Ils sont disposés au fond du tube de décharge en pyrex (140 mm x 6 mm) contenant deux à trois bâtonnets de CuO et deux à trois petits grains de CaO. Les tubes sont connectés à une rampe à vide.

Lorsqu'un vide de 10^{-3} mbar est obtenu, on scelle sous vide les tubes de décharge. Les tubes ainsi scellés sont chauffés une nuit au four à 570°C . Après refroidissement, la mesure de l'excès isotopique a été faite au spectromètre optique (SOPRA GS01) au laboratoire de Microbiologie forestière de l'I.N.R.A. (C.N.R.F.- Champenoux).

Principe du spectromètre optique

Le principe de la spectrométrie d'émission est le suivant : la présence de ^{15}N dans la molécule d'azote gazeux (N_2) provoque un déplacement de certaines bandes du spectre d'émission quand la molécule est excitée par un champ électrique oscillant à haute fréquence. C'est ainsi que la longueur d'onde de la bande principale, émise dans l'ultraviolet, se situe à 297,7 nm pour les molécules $^{14}\text{N}^{14}\text{N}$, à 298,3 nm pour les molécules $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$, et 298,9 nm pour les molécules $^{15}\text{N}^{15}\text{N}$. Le spectromètre optique, par un système dispersif approprié (réseau concave), sépare ces différentes bandes. L'utilisation d'un détecteur photoélectrique et d'un enregistreur permet de mesurer leur intensité et de calculer la teneur en azote 15 de l'échantillon analysé (Fiedler et Prosch, 1975 ; Martin *et al.*, 1981). Le spectromètre optique utilisé est le GS 1 fabriqué par SOPRA (Bois-Colombes, France).

Étalonnage du spectromètre optique

Du fait d'une résolution insuffisante des pics 28, 29, et 30, le spectromètre optique donne un spectre de bandes caractéristiques des molécules (Guiraud, 1984). Il va donc falloir tracer, à l'aide d'échantillons préalablement analysés avec un spectromètre de masse, la courbe d'étalonnage du spectromètre optique.

Formules de calcul

Le pourcentage d'azote 15 d'un échantillon est donné par la formule suivante :

$$A \% \text{ } ^{15}\text{N} = \frac{\frac{1}{2}H(^{14}\text{N}^{15}\text{N}) + H(^{15}\text{N}^{15}\text{N})}{H(^{15}\text{N}^{15}\text{N}) + H(^{14}\text{N}^{15}\text{N}) + H(^{14}\text{N}^{14}\text{N})} \times 100$$

"H" étant la hauteur de pic

Le remplacement dans cette formule générale par la valeur correspondante de hauteur de pic mesurée au spectromètre optique permet donc de calculer A% ¹⁵N. Les hauteurs des pics (¹⁴N¹⁵N) et (¹⁵N¹⁵N) sont préalablement divisées par le facteur d'amplification. Cependant, même si le pic 30 est trop petit pour être mesuré avec précision, il est possible de calculer le pourcentage d'azote 15 à partir des seules valeurs des pics 28 et 29, à condition toutefois que le gaz soit en équilibre isotopique. Dans ce cas, les atomes ¹⁴N et ¹⁵N se combinent au hasard pour donner les molécules ¹⁴N¹⁴N, ¹⁴N¹⁵N, ¹⁵N¹⁵N. Si "p" représente le nombre d'atome ¹⁴N et "q" le nombre d'atome ¹⁵N, l'équation suivante est alors vérifiée :

$$p+q = 1 \text{ et } (p+q)^2 = 1 = p^2 + 2pq + q^2$$

p^2 : étant proportionnel au nombre de molécules ¹⁴N¹⁴N

$2pq$: étant proportionnel au nombre de molécules ¹⁴N¹⁵N

q^2 : étant proportionnel au nombre de molécules ¹⁵N¹⁵N

Il est facile de mesurer le rapport :

$$R = \frac{^{14}\text{N}^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}^{14}\text{N}} = \frac{29}{28} = \frac{2pq}{p^2} = \frac{2q}{p} \quad (1)$$

Le pourcentage d'azote 15 dans le gaz est par définition :

$$A\% = \frac{q}{p+q} \times 100$$

donc en divisant le numérateur et dénominateur par p :

$$A\% = \frac{\frac{q}{p}}{1 + \frac{q}{p}} \times 100$$

et d'après l'équation (1) :

$$A\% = \frac{R/2}{1 + R/2} \times 10$$

$$A\% = \frac{100 R}{2 + R}$$

De la même façon, dans le cas d'un composé fortement enrichi, on peut déterminer le pic 30 et calculer un rapport $R' = \frac{30}{29}$; on peut déterminer :

$$A' = \frac{200 R'}{2R' + 1}$$

Analyse par couplage Analyseur N - spectromètre de masse

Tous les dosages ont été fait par le Laboratoire Central d'Analyse du CNRS à Lyon par l'équipe de Monsieur Casabianca.

La transformation du sulfate d'ammonium (échantillon issu de la minéralisation Kjeldahl ou de la distillation de l'azote minéral), en azote gazeux se fait en traitant l'échantillon par une solution d'hypobromite de lithium en milieu totalement exempt d'air, selon la technique décrite par Rittenberg (1948) cité par Recous (1988).

La composition isotopique de l'azote moléculaire est ensuite déterminée avec un spectromètre de masse VG SIRA 9 à double référence étalonné par rapport à l'air.

Une aliquote de l'ordre de 0,1% du flux de gaz sortant de l'analyseur est envoyée (via une vanne aiguille et un capillaire en inox) vers le spectromètre de masse. Un flux continu d'hélium arrive donc au spectromètre de masse, avec une pression partielle en azote qui varie continuellement au cours du temps (suivant le pic d'élution de la colonne chromatographique).

Contrairement à la méthode classique dans laquelle on mesure à l'équilibre les courants 29 ($^{14}\text{N } ^{15}\text{N}$) et 28 ($^{14}\text{N } ^{14}\text{N}$), on mesure ici un rapport de charges (courant x temps) en intégrant les pics 28 et

29. Le cycle total d'un échantillon est de 210 secondes dont 155 secondes d'intégration du pic.

Ce type d'analyse dynamique ne permet pas de se référer en parallèle au gaz de référence. Il est alors nécessaire de prendre en compte :

- l'azote provenant de l'échantillonneur automatique : pour cela on réalise des "blancs" avec des nacelles vides ;

- l'azote provenant de l'hélium vecteur, qui constitue le "bruit de fond", se traduit par une ligne de base. Celle-ci est mesurée au début et à la fin de chaque analyse.

On calibre ensuite les abondances, en analysant des échantillons d'abondances isotopiques connues et différentes : généralement de l'atropine ($A = 0,3612\%$) et du sulfate d'ammonium ($A = 0,5663\%$). On corrige la dérive d'abondance de deux façons :

- par la mesure en dynamique d'une référence (généralement de l'atropine) tous les 5 échantillons ;

- par la mesure en statique d'un gaz de référence en présence du flux d'hélium, entre 2 échantillons.

Les quantités analysées varient entre 50 et 100 μg N/échantillon. La masse de l'échantillon utilisé, déterminée par une microbalance à 0,01 mg pour les plantes et 20 à 50 mg pour les sols.

La précision nominale du spectromètre de masse est de plus ou moins 0,0003% c'est à dire environ 1% d'erreur sur l'abondance (Recous, 1988).

DEUXIEME PARTIE :
CONTRIBUTION A L'ETUDE DES
POTENTIALITES AGRONOMIQUES DES
SOLS

CHAPITRE III : CLASSIFICATION DES SOLS ET DETERMINATION DE LEURS POTENTIALITES (exemple des sols lorrains).

3.1. : INTRODUCTION.

L'agriculture est aujourd'hui confrontée à de nombreux problèmes:

- Baisse des prix des produits agricoles.
- Augmentation des charges inhérentes à la production.
- Risques écologiques des systèmes de culture intensifs.

L'agriculture doit être alors, productive, économe et non polluante : il est donc nécessaire de fixer des objectifs de rendement cohérents avec l'aptitude à produire d'un sol, donc de bien connaître ses potentialités agronomiques (Florentin, 1991).

Pour la productivité et l'économie les potentialités du milieu (climat, sol) par rapport à une production agricole doivent être clairement définies (Plet, 1988). Les termes aptitude et potentialité sont employés indistinctement, c'est pourquoi nous examinerons d'abord la signification de ces termes.

Un terrain présente un ensemble de qualités et défauts qui le rendent plus ou moins propice à telle ou telle utilisation. Cet ensemble découle des considérations liées au terrain lui-même (facteurs intrinsèques), et à sa situation par rapport aux autres terrains (facteurs extrinsèques). La considération de cet ensemble aboutit à la notion d'aptitude du terrain. Nous appellerons aptitude actuelle d'un terrain l'aptitude qu'il présente au moment de son utilisation ; l'aptitude potentielle de ce terrain se définit comme la nouvelle aptitude qu'il est susceptible d'acquérir après amélioration de certaines de ses caractéristiques (Marin-Laflèche, 1972 ; Bartelli, 1978)

Par ailleurs Sébillotte (1989) définit trois niveaux de potentialités : une potentialité théorique (PT) d'un milieu qui se définit comme la production maximale de matière permise par la photosynthèse (facteur limitant l'énergie lumineuse) ; ce potentiel suppose :

- que les cultures interceptent totalement le flux lumineux
- qu'il n'y ait pas de périodes d'inoccupation du sol, et
- que la température ne limite pas la croissance.

Ces conditions n'étant pas réalisées, on définit une potentialité culturelle (PC) dépendant de la température et de la succession des

cultures. Cette notion intègre des besoins potentiels en éléments minéraux, oxygène, eau... qui doivent être satisfaits par le milieu. Généralement ce milieu sera limitant pour certaines cultures et l'agriculteur s'efforcera de le corriger mais les limitations des moyens techniques ne lui permettront de lever que certains facteurs et conditions limitants ; on définit alors une potentialité agricole (PA) pour une surface, un système de culture et un milieu donné (Boiffin et Sébillotte, 1982 ; Delsert, 1993).

Au cours de nos études nous assimilerons le concept de potentialité culturelle (PC) à celui d'aptitude culturelle actuelle et le concept de potentialité agricole (PA) à celui d'aptitude culturelle potentielle. Enfin ce dernier concept a été précisé par le Comité National Potentialités animé par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. Cette potentialité de production est définie pour une espèce végétale dans un milieu donné. Il s'agit de : "l'évaluation des niveaux de production et de leur fréquence d'obtention sous un itinéraire technique non limitant pour une culture et un type de sol donnés en fonction de la variabilité géographique et interannuelle du climat".

D'autre part il pourrait paraître déplacé de s'intéresser aux potentialités quand la surproduction semble dominer le paysage économique de l'agriculture et induire une série croissante de contraintes sur l'environnement ou la qualité des produits alimentaires (Hervé, 1991). Cependant une agriculture "viable" est essentielle à une protection efficace de l'environnement, il faut donc considérer dans la définition des potentialités du milieu le respect de l'environnement et la reproductibilité, de l'anglais "*sustainability*", des unités de production (Sébillotte et Meynard, 1990).

La démarche qui conduit à la connaissance du milieu vise principalement à en comprendre l'organisation et le fonctionnement d'ensemble ; ses objectifs sont *à priori* distincts de la démarche visant à définir l'utilisation du milieu et les informations recherchées ne sont pas nécessairement les mêmes (Siband, 1989) ; cependant, l'évaluation de la potentialité ou aptitude culturelle d'un milieu se fonde en premier lieu sur une appréciation de son potentiel agricole défini à partir des caractéristiques topographiques, climatiques et de la nature des sols (Pieri, 1989).

Pour mieux connaître les potentialités agricoles d'un milieu, il faut donc bien étudier et caractériser les facteurs du milieu lui même (dont le climat et le sol) à l'aide des classifications naturelles et

techniques qui permettent de définir des ensembles plus ou moins homogènes quant aux caractéristiques d'intérêt agronomique (Bartelli, 1978 ; Cline, 1980 ; Sinaj, 1990).

Classer les sols par rapport à leurs potentialités est une opération délicate : tout système de classement prête en effet à discussion, car la part de subjectivité introduite est bien souvent importante : on classe toujours par rapport à quelque chose et pour quelque chose. La superficie à étudier ainsi que l'objectif de l'étude, définira l'échelle de travail et donc l'approche de potentialité à utiliser.

* * * * *

Depuis une quinzaine d'années les organisations professionnelles agricoles de Lorraine ont mis l'accent, parmi leurs priorités, sur la nécessité d'acquérir une meilleure connaissance des sols agricoles de la région et de ce fait d'optimiser leur valorisation et connaître leurs facteurs limitants et leurs fragilités vis-à-vis de l'environnement.

A la demande de la Chambre Régionale d'Agriculture une esquisse pédologique de la Lorraine financée par la Région a été réalisée en 1980 ; cette esquisse au 1/250000^e, complétée par l'Atlas des Sols de Lorraine (Jacquin et Florentin, 1988), met en évidence des "régions pédologiques", présentant les mêmes types de terrain, possédant des aptitudes agricoles voisines et posant globalement des problèmes d'aménagement et d'environnement similaires. Parmi ces régions une quinzaine méritaient particulièrement une étude plus approfondie du fait de leur importance et de leur représentativité.

Quant à l'étude des potentialités des sols en Lorraine une première approche a été réalisée avec les travaux sur blé de la Chambre Régionale d'Agriculture (Limaux, 1985) : à partir d'une appréciation à la tarière de la texture et de la profondeur d'enracinement du sol, cet auteur a mis en relation les rendements avec le niveau de déficit hydrique cumulé. Florentin (1991), analysant les critères permanents du sol en relation avec le comportement de deux grandes cultures (blé et colza), souligne en région Lorraine l'importance de 4 critères (la roche-mère, la profondeur du sol, le développement du profil et l'excès en eau) dans l'élaboration du rendement.

* * * * *

L'étude de deux secteurs de références situés dans les départements de la Meuse et des Vosges entrent dans le cadre de cette démarche générale. Ils furent choisis en accord avec les Chambres d'Agriculture pour plusieurs raisons : bonne représentativité quant à la

nature des sols, des sous-sols (roches calcaires et marneuses en Meuse ; grès, granites et migmatites dans les Vosges), des types d'exploitation et des climats ; sans oublier le degré de motivation des agriculteurs et des techniciens.

L'étude a consisté dans un premier temps à caractériser les types de sols de chacun des deux secteurs, puis de choisir les sols les plus représentatifs des deux secteurs pour les classer taxonomiquement et pour mettre en évidence leurs potentialités agropédologiques à l'aide de classifications techniques des sols et de l'évaluation des rendements ponctuels.

L'inventaire puis la cartographie des sols furent effectués pendant la campagne 1991 pour le secteur du Barrois en Meuse (Palma-López, 1991 ; Rondeau et Palma-López, 1991) et pendant la campagne 1992 pour le secteur des Vosges (Rondeau et Palma-López, 1992). Les deux études ont été réalisées en étroite collaboration avec les Chambres Départementales d'Agriculture de la Meuse et des Vosges.

Le but final de cette étude consistait donc à discuter de la démarche à utiliser pour déterminer les potentialités des sols lorrains, d'autre part de déterminer si une application était possible dans une région tropicale du Mexique en utilisant cette démarche comme outil d'aménagement du territoire et du développement agricole.

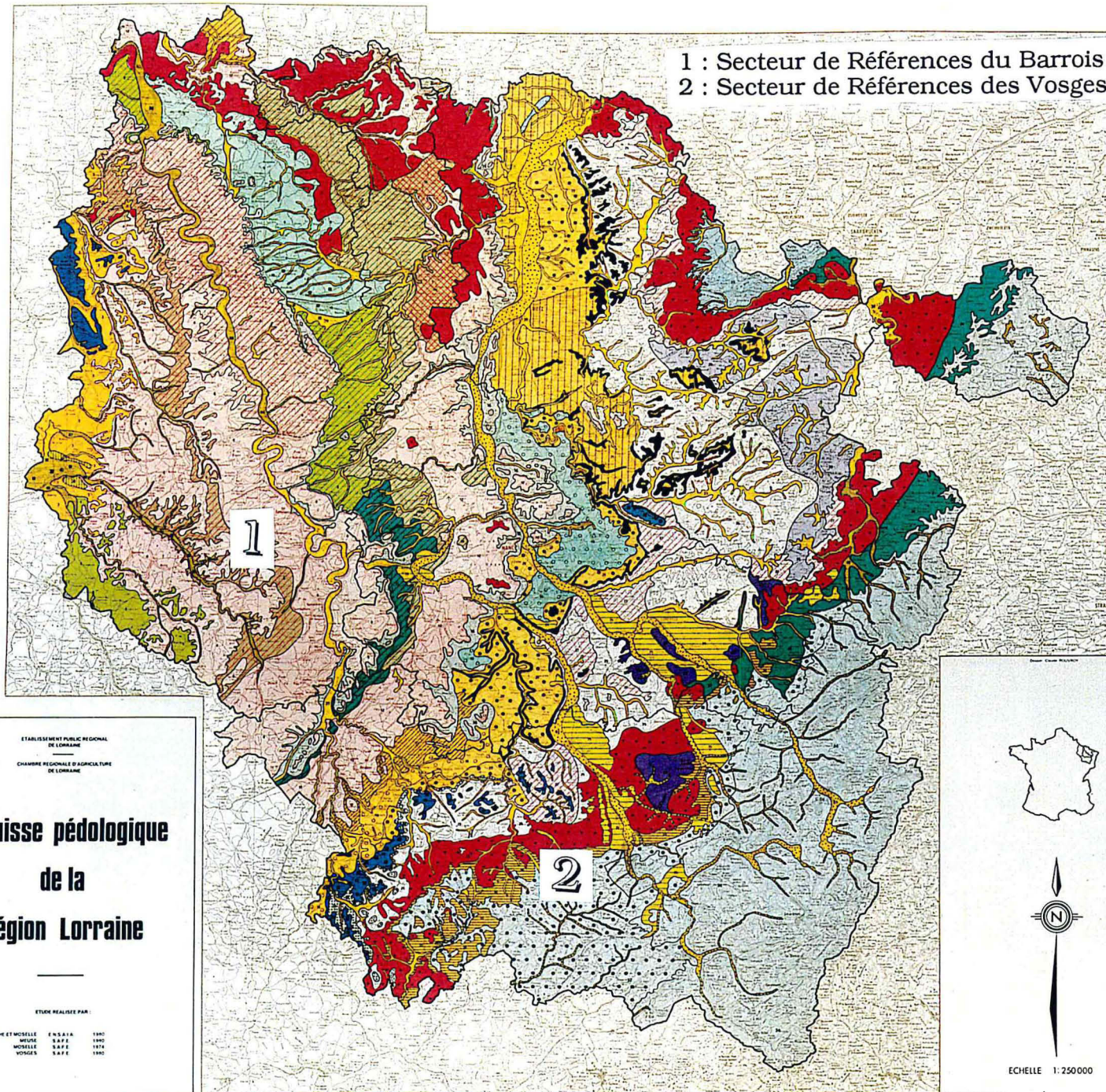
3.2. LE MILIEU ET LES METHODES.

La localisation des secteurs de références du Barrois et des Vosges est présentée sur la figure 3.1.

3.2.1. DESCRIPTION DES MILIEUX.

Le secteur de références du Barrois en Meuse

Le Barrois est une région de plateaux calcaires faiblement vallonnés, entaillés par quelques vallées bien marquées ; cette région naturelle s'étend aussi sur les départements voisins (Haute-Marne et Vosges). Dans ce secteur d'études on a distingué deux sous-secteurs en



ETABLISSEMENT PUBLIC REGIONAL
DE LORRAINE
CHAMBRE REGIONALE D'AGRICULTURE
DE LORRAINE

Esquisse pédologique de la Région Lorraine

ETUDE REALISEE PAR

MELNTHÉ ET MICHELLE	E N S A F A	1960
MEUSE	S A F F E	1960
MICHELLE	S A F F E	1974
VOGUES	S A F F E	1980

PROVINCE	DEPT	COMMUNE	SOUS-SECTEUR	TYPE DE SOLS	REPARTITION DES SOLS
Moselle	Moselle	Château-Salins	1	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	2	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	3	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	4	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	5	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	6	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	7	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	8	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	9	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	10	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	11	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	12	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	13	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	14	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	15	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	16	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	17	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	18	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	19	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	20	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	21	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	22	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	23	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	24	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	25	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	26	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	27	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	28	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	29	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	30	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	31	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	32	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	33	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	34	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	35	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	36	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	37	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	38	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	39	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	40	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	41	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	42	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	43	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	44	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	45	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	46	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	47	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	48	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	49	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	50	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	51	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	52	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	53	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	54	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	55	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	56	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	57	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	58	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	59	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	60	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	61	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	62	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	63	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	64	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	65	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	66	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	67	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	68	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	69	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	70	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	71	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	72	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	73	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	74	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	75	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	76	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	77	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	78	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	79	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	80	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	81	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	82	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	83	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	84	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	85	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	86	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	87	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	88	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	89	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	90	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	91	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	92	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	93	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	94	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	95	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	96	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	97	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	98	Sols superficiels	100%
Moselle	Moselle	Château-Salins	99	Sols superficiels	100%
		Château-Salins	100	Sols superficiels	100%

Fig 3.1 : localisation des Secteurs de Références en Lorraine

fonction de la géologie et de la géomorphologie ; la surface étudiée est d'environ 1200 ha.

Le sous-secteur du Portlandien est uniforme dans ses altitudes (290-310 m.) et dans le dénuement de ses paysages voués aux grandes cultures ; les formes du relief sont peu accentuées et les pentes ne sont jamais excessives. La géologie est constituée par un étage du Jurassique supérieur formé des calcaires lithographiques à grain fin, fissurés, des calcaires à débris, des calcaires argileux tendres et grisâtres ; des placages limoneux éoliens peu épais (40-100 cm) et disséminés çà et là sans grande logique apparente peuvent masquer ces formations.

Le sous-secteur du Kimméridgien présente des reliefs bien marqués avec des pentes plus vigoureuses (jusqu'à 15%), entraînant des variations d'altitude (225-290 m) ; le paysage se partage entre cultures (blé-orge-colza-maïs fourrage) et prairies. Sur les coteaux du Kimméridgien on distingue facilement l'alternance de couches tendres et dures, ces dernières formant un ressaut dans la pente ; les couches tendres sont soit des calcaires argileux gris clair ou des marnes assez argileuses gris ardoise pétries d'une multitude de coquilles d'une petite moule (*Exogyra virgula*). Les couches dures prennent "en sandwich" ces dernières : ce sont des bancs calcaires du Kimméridgien moyen et inférieur.

Le climat de ce secteur est caractérisé par un mélange d'influences océaniques (pluviométrie uniformément répartie sur toute l'année) et continentales (écarts thermiques importants : hivers assez longs et étés orageux). La température moyenne annuelle est de 9°C ; les précipitations et l'évapotranspiration totale annuelle moyenne sont respectivement de 976 et 661 mm ; les écarts de précipitations entre les différentes années sont importants.

Le Secteur de références des Vosges

Du fait de grandes différences sur le plan des altitudes, du climat et de la géologie nous avons divisé ce secteur en deux sous-secteurs ; le sous-secteur d'Uzemain qui est représentatif de la région naturelle de la Vôge et le sous-secteur de Corcieux qui caractérise la région des Vosges moyennes. La surface étudiée est d'environ 1100 ha.

Dans le sous-secteur d'Uzemain la surface cartographiée est caractérisée par un sous-sol gréseux ; des failles ont disloqué ce

plateau et les reliefs sont assez accidentés malgré la relative faiblesse des altitudes (350 à 550 m) ; c'est une région boisée (45% de la surface totale) ; l'occupation de l'espace est en partie conditionnée par le degré d'hydromorphie des sols et par la pente : les prairies sur les sols hydromorphes et les bois sur les pentes fortes. La géologie de ce sous-secteur est simple ; ce sont des dépôts continentaux acides datés du Trias inférieur (Buntsandstein) ; à la base de l'étage prédominant surtout les grès, tandis qu'au sommet on a une alternance de grès et d'argiles "lie-de-vin" ; cependant les argiles carbonatées observées à Naymont (unité pédologique 7), appartiennent aux faciès marins du Muschelkalk moyen.

Le climat de ce sous-secteur est sous influences océaniques ; ceci se traduit par une pluviométrie annuelle assez élevée (1099 mm en moyenne) et régulièrement répartie sur toute l'année ; il est aussi sous influences continentales, marquées par des écarts thermiques importants (hivers assez longs et étés orageux) ; la température moyenne annuelle est de 9,2°C.

Le sous-secteur de Corcieux fait partie de la région naturelle des Vosges moyennes ; sa morphogénèse est ancienne et a donné des plateaux ondulés et des croupes bien reconnaissables sur le secteur. Les nombreux vallons, larges ou resserrés individualisent toute une série de collines dont les altitudes croissent du Nord au Sud (540-684 m).

La géologie est formée par des roches éruptives, granites et migmatites, mis en place à l'ère primaire. Les migmatites de Gerbépal couvrent environ 80% de la zone d'étude ; ce sont des roches qui comportent à la fois les caractères des gneiss (litage des cristaux) et des granites (composition chimique voisine) ; le granite proprement dit (granite de Remiremont) forme des petits massifs au Nord et au Centre du sous-secteur. Les deux roches donnent par altération des arènes sablo-graveleuses comportant des cailloux et des blocs.

Le climat de ce sous-secteur est davantage marqué par l'influence montagnarde ; les hivers sont plus longs (Novembre-Mars) et plus rigoureux ; les précipitations annuelles sont abondantes (1690 mm en moyenne) et réparties sur toutes les saisons avec cependant un pic en hiver, ce qui fait que les pertes en eau par évapotranspiration sont toujours couvertes par les précipitations.

3.2.2. LES METHODES.

La méthodologie de cartographie et description de profils a été largement inspirée de l'ouvrage de Jamagne (1967) : "bases et techniques d'une cartographie des sols".

3.2.2.1. Prospection pédologique.

L'échelle de la carte est le 1/25000^e, et cela nécessite la réalisation d'un travail de terrain à plus grande échelle. La prospection systématique a été faite au 1/10000^e en utilisant comme support l'agrandissement des cartes topographiques de l'I.G.N. au 1/25000^e. Le principe d'un relevé de terrain par hectare (ou par cm² de la carte de travail) a été retenu ; mais en fonction de l'hétérogénéité rencontrée on a été amené dans certains cas à augmenter la densité de ces observations.

La cartographie a été réalisée avec une tarière de 1.20 m ; chaque fois que cela était possible, les sondages descendaient jusqu'à 1.10 m à moins que la roche-mère ou des matériaux grossiers ne s'interposent. A chaque sondage, pour chaque horizon ont été appréciés : la couleur, la texture (impression tactile), la présence ou l'absence de carbonates par réaction à l'acide chlorhydrique dilué, la charge caillouteuse, le degré d'hydromorphie, la plasticité et la présence de nodules ou concrétions. Il a été fait des observations complémentaires portant sur la topographie, la présence de fissures et cailloux ou croûte de battance en surface. Cette première connaissance a permis de regrouper des ensembles d'observations semblables et par extrapolation, à l'aide du relief, de la géologie et parfois de la végétation, de constituer des unités cartographiques de sols relativement homogènes visualisées sur la carte (séries de sols).

3.2.2.2. L'examen des profils pédologiques.

Sur chacune des unités cartographiques définies on a ouvert des fosses pour y décrire le profil-type (au moins un profil par unité de sol, parfois plus en fonction de la variabilité de l'unité cartographique). Les fosses ont été ouvertes jusqu'à 2 m. de profondeur à moins que la roche-mère ou des éléments grossiers ne s'interposent. La description détaillée des profils complète les données des sondages tarière ; elle

permet de mieux apprécier la distribution des horizons et de décrire pour chacun d'eux la structure, la texture, l'activité biologique (racines et faune), la couleur principale du sol et des taches (code Munsell), le degré d'hydromorphie, la répartition des éléments grossiers, la présence de signes d'évolution génétique du sol (concrétions, nodules, fentes de retrait, couches cimentées...) et la profondeur "réelle" du sol.

Sur chaque profil et au niveau de chaque horizon des échantillons ont été prélevés en vue de la réalisation d'analyses physico-chimiques ; ces analyses ont été réalisées par le laboratoire SAS à Ardon pour le secteur du Barrois et par le laboratoire INRA d'Arras pour le secteur des Vosges (cf. profils types en annexes : I-1 à I-10). Les déterminations réalisées sont en accord avec celles préconisées par Baize (1988), à savoir :

- Granulométrie 5 fractions (méthode densimétrique)
- Carbone organique (méthodes Walckley et Black et Anne pour les laboratoires SAS et INRA respectivement).
- Azote total (méthode Kjeldhal).
- pH eau et KCl.
- Phosphore : méthodes Joret-Hébert ou Dyer selon le pH du sol.
- Capacité d'Echange Cationique (C.E.C.) (méthode Metson).
- Cations échangeables : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et K^+ (méthode Metson).
- Aluminium "libre" et total par la méthode Tamm modifiée.
- Fer : "libre" (méthode Deb) et total (extraction par l'acide fluorhydrique).

A noter que ces profils ont été décrits à une époque où le développement racinaire était supposé maximum, afin d'observer les relations plante-sol ; en effet, chaque description de profil a été complétée par la réalisation d'un profil racinaire sur une largeur de 50 cm à partir d'une grille de maille 2x2 cm. avec une notation simple du type présence ou absence de racines (Tardieu, 1988 ; voir annexes I-11 et I-12).

3.2.2.3. La classification des sols.

Nous considérerons une classification des sols comme un "système de références permettant d'ordonner les sols décrits dans une étude et les unités d'une carte, suivant un plan commun ; c'est en même temps un ensemble définissant un langage" (Lozet et Mathieu, 1990). Nous emploierons deux types de classification des sols :

- D'une part, les systèmes de classifications dites "naturelles", qui permettent de classer les sols par rapport à leurs caractéristiques elles-mêmes et qui ont comme principal but d'identifier (nommer) des ensembles de sols pour permettre leur utilisation postérieure.

- D'autre part, des classifications techniques des sols ou classifications des aptitudes des sols ou bien classifications des potentialités des sols, lesquelles ont comme but de définir des ensembles homogènes de sols par rapport à certains facteurs du milieu jugés limitants pour une certaine utilisation agricole (Bartelli, 1978 ; Cline, 1980 ; Hallaire, 1981 ; Duchaufour, 1983 ; Buol *et al*, 1989 ; Lozet et Mathieu, 1990).

Les classifications "naturelles"

- Pour définir les unités cartographiques des sols (séries), nous avons pris comme base la classification française des sols (C.P.C.S., 1967) : il s'agit d'une classification génétique utilisant comme principes de base pour définir les classes : le degré d'évolution du profil, l'intensité d'altération pédogénétique, le type d'humus et certains facteurs fondamentaux d'évolution des sols qui deviennent prédominants : saturation par l'eau ou présence de sels très solubles. Ce système est structuré à différents niveaux : la classe, la sous-classe, le groupe, le sous-groupe, la famille et la série. Les différents sols rencontrés dans les deux secteurs ayant été classés (Rondeau et Palma-López, 1991 et 1992), nous avons choisi pour cette étude, les cinq sols les plus représentatifs de chaque secteur.

Ensuite pour relier la taxonomie des dix sols retenus à la détermination de leurs potentialités, nous avons utilisé un Référentiel Pédologique et deux autres systèmes de classification :

- Le Référentiel Pédologique (A.F.E.S., 1992) est un système élaboré en France pour remplacer le système français de classification des sols (C.P.C.S., 1967) il est pensé pour une utilisation européenne. Ce système reste basé sur des principes morpho-génétiques, avec cependant deux innovations majeures : les objets étudiés sont les couvertures pédologiques avec des horizons qui se succèdent verticalement et latéralement ; le système n'est pas une classification hiérarchisée. Il comporte deux catégories : les références et les types, ces derniers sont constitués par la subdivision d'une référence par

adjonction d'un ou plusieurs qualificatifs (A.F.E.S., 1992 ; Duchaufour, 1991).

- La classification américaine ou "Soil Taxonomy" (Soil Survey Staff, 1975 et 1992), cette classification demeure l'une des plus employées dans le monde (Beinroth *et al*, 1980) : elle classe les sols d'après un ensemble de caractères mesurables (physico-chimiques et morphologiques), qui définissent des horizons diagnostiques traduisant une parenté génétique ; il s'agit bien d'une classification morpho-génétique (Lozet et Mathieu, 1990) avec une base statistique (Duchaufour, 1991). Ce système présente 6 catégories hiérarchisées : l'ordre, le sous-ordre, le grand-groupe, le sous-groupe, la famille et la série (Soil Survey Staff, 1975) .

- Enfin nous avons utilisé la légende de la carte des sols du monde de la FAO-UNESCO (FAO, 1989), il s'agit d'une légende qui ne suit pas un schéma ordonné élaboré à partir de concepts hiérarchisés ; elle précise simplement les diverses unités réparties sur une carte. Ce système comprend trois catégories : les groupements principaux de sols (28 groupements), sous-divisés au second niveau en 153 unités pédologiques, enfin un troisième niveau des sous-unités pédologiques qui sont des intergrades entre unités pédologiques du premier ou du second niveau. Son but principal est de représenter les sols du monde sur une carte et de permettre l'extrapolation d'informations concernant les différents types de sols. On peut considérer ce système comme une simplification de la "Soil Taxonomy" (Buol *et al*, 1989 ; FAO, 1989 ; Driessen et Dudal (eds), 1991 ; Duchaufour, 1993). Ce système originellement basé sur des concepts morpho-génétiques a évolué au cours de sa dernière version (FAO, 1989), vers un mode de pensée plus génétique (Duchaufour, 1993).

Les classifications "techniques"

Pour essayer de classer les potentialités des dix sols sélectionnés nous avons fait appel à trois types d'évaluation des terres. Ce choix nous l'avons porté sur des systèmes d'évaluation des terres utilisant les informations découlant des études pédologiques, tout en adoptant trois approches différentes. Deux d'entre elles sont considérées par Hallaire (1981) comme des méthodes d'évaluation analytiques : l'évaluation passe par l'examen de chacun des facteurs intervenant dans la valeur du sol ; ces classifications sont :

- La méthode utilisée par le Service de Conservation des Sols du Département d'Agriculture des Etats Unis (USDA), pour définir l'aptitude des sols face à son utilisation agricole (Klingebiel et Montgomery, 1961 ; IMTA, 1988). Ce système répartit les sols en huit classes hiérarchisées, dont les quatre premières sont conseillées pour une utilisation agricole, les classes V et VI pour le pâturage, la classe VII pour la forêt et la classe VIII pour les réserves de la vie sauvage (Bartelli, 1978 ; Hallaire, 1981). C'est un système d'inventaire et classement des contraintes (Hallaire, 1981). Cette méthode utilise les concepts de potentialité culturelle (PC) de Sébillotte (1989) ou d'aptitude culturelle actuelle (Marin-Lafèche, 1972 ; Bartelli, 1978) ; il a été élaboré pour répondre aux problèmes d'aménagement du territoire à petites et moyennes échelles (1/250000^e à 1/50000^e).

- L'autre méthode analytique utilisée correspond à une approche régionale développée pour la Région Centre de la France (Lafrechoux et al. 1983) ; c'est une évaluation paramétrique qui donne des valeurs (sous forme de notes), à chacun des facteurs intervenant dans la potentialité du sol (sept facteurs) ; les notes sont additives de telle façon que la somme des notes du meilleur sol corresponde à 100 points. Ensuite on sépare arbitrairement les sols en quatre classes hiérarchiques par rapport à l'aptitude agricole du sol : la classe A (80-100 points) ; la classe B (60-80 points) ; la classe C (40-60 points) et la classe D (<40 points). La méthode considère le concept de potentialité culturelle (PC) de Sébillotte (1989) et elle a été utilisée pour des études régionales à moyenne échelle (1/50000^e).

- Enfin, nous avons utilisé une méthode d'appréciation globale de la potentialité des sols par la mesure des rendements ponctuels : les cultures utilisées sont : le maïs fourrage, l'orge et le colza. Les rendements ont été mesurés sur placettes et en choisissant des parcelles avec des itinéraires techniques similaires et non limitants par rapport à l'expression du potentiel. Cette approche, à la différence des approches antérieures, se réfère au concept de potentialité agricole (PA) de Sébillotte (1989) et doit s'employer dans des études à grande échelle (1/5000^e) ou au niveau de la parcelle.

3.3. CARACTERISATION ET CLASSIFICATION DES PRINCIPAUX SOLS DANS LES DEUX SECTEURS.

Pour les deux secteurs les caractéristiques de classification utilisées pour définir les diverses unités pédologiques sont :

- La nature de la roche-mère : calcaires, marnes, limons et alluvions-colluvions pour le secteur du Barrois ; grès, granites, migmatites et alluvions-colluvions pour le secteur des Vosges.

- La texture du sol

- La profondeur du sol (sols superficiels, moyennement profonds et profonds).

- La carbonatation des horizons et le lessivage pour le secteur du Barrois (sols calcaires, calciques ou lessivés).

- Le degré d'hydromorphie du profil (sols sur alluvions-colluvions, sur marnes et sur argiles).

- La position topographique (surtout pour le sous-secteur de Corcieux).

Ces critères nous ont permis de cartographier treize types de sol avec deux variantes dans le secteur du Barrois (Rondeau et Palma-López; 1991 ; cf. carte des sols 1) et dix huit types de sol avec une variante dans le secteur des Vosges (Rondeau et Palma-López, 1992 ; cf. carte des sols 2).





- Sur le secteur du Barrois presque tous les sols appartiennent à la classe des sols calcimagnésiques (sols bruns calcaires ou calciques), caractérisés par l'abondance du carbonate de calcium au sein du matériau originel (calcaires, marnes) ; seuls les sols sur limons font exception et il a été possible d'observer un léger lessivage des argiles sur ces profils. Les sols développés sur alluvions et colluvions sont particuliers, car ils ont pris naissance sur un matériau d'apport calcaire à granulométrie variable (cf. carte des sols 1).

- Pour le secteur des Vosges, étant donné la géologie, tous les sols recensés sont des sols bruns acides : les grès, granites, migmatites et argiles sont pauvres en cations basiques ; les produits d'altération (sables, arènes) présentant un pH compris entre 4 et 5 ; mais au niveau de l'horizon de surface le pH est plutôt compris entre 5.5 et 6 du fait des amendements calciques apportés par les agriculteurs.(cf. cartes des sols 2 et 2').



CARTE DE SOLS 1
SECTEUR DE REFERENCES DU BARROIS

SOLS SUR CALCAIRES DURS : Plateau du Portlandien et replats du Kimméridgien

SOLS SUPERFICIELS CAILLOUTEUX




-  1. Sols bruns calcaires (très carbonatés)
 -  1'. Variante très caillouteuse
-  2. Sols bruns calciques (non carbonatés) ou calcaires (peu carbonatés)
 -  2'. Variante très caillouteuse

SOLS MOYENNEMENT PROFONDS

-  3. Sols bruns calcaires (très carbonatés)
-  4. Sols bruns calciques (non carbonatés) ou faiblement calcaires (peu carbonatés)

SOLS SUR MARNES ET CALCAIRES TENDRES : Versants du Kimméridgien et du Portlandien


SOLS SUR KIMMERIDGIEN

-  5. Sols bruns calcaires hydromorphes sur marnes grisâtres
-  6. Sols bruns calcaires légèrement hydromorphes sur calcaires tendres
-  7. Sols bruns calcaires profonds sur colluvions

SOLS SUR PORTLANDIEN



-  8. Sols bruns calcaires moyennement profond sur calcaires marneux

SOLS SUR PLACAGES LIMONEUX : Plateau du Portlandien

-  9. Sols bruns faiblement lessivés

SOLS SUR ALLUVIONS-COLLUVIONS : Bas de pente et Vallons



SOLS DES VALLONS ET BAS DE PENTE

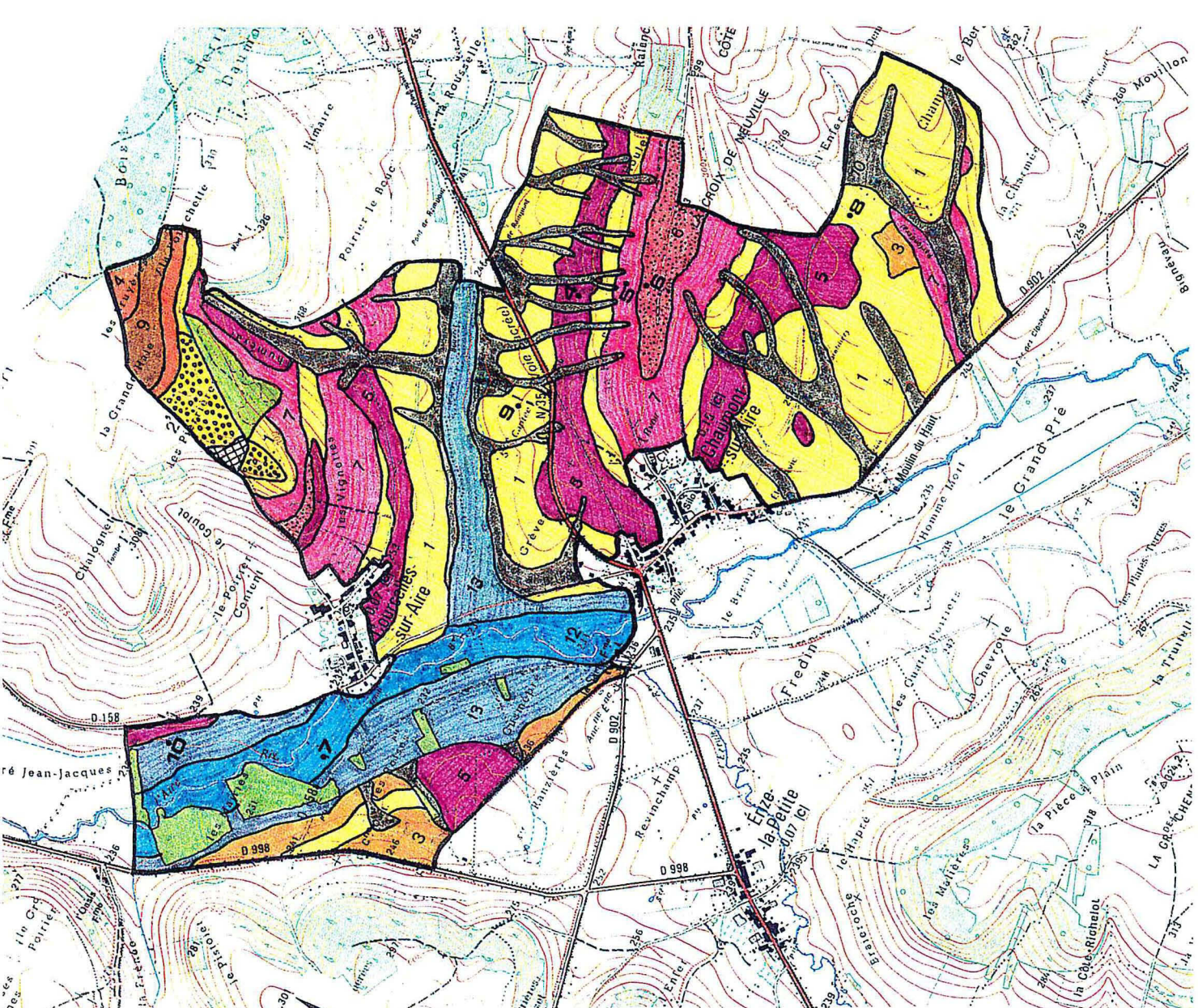
-  10. Sols bruns colluviaux argileux à limono-argileux
-  11. Sols bruns colluviaux limoneux

SOLS DE LA VALLEE DE L'AIRE

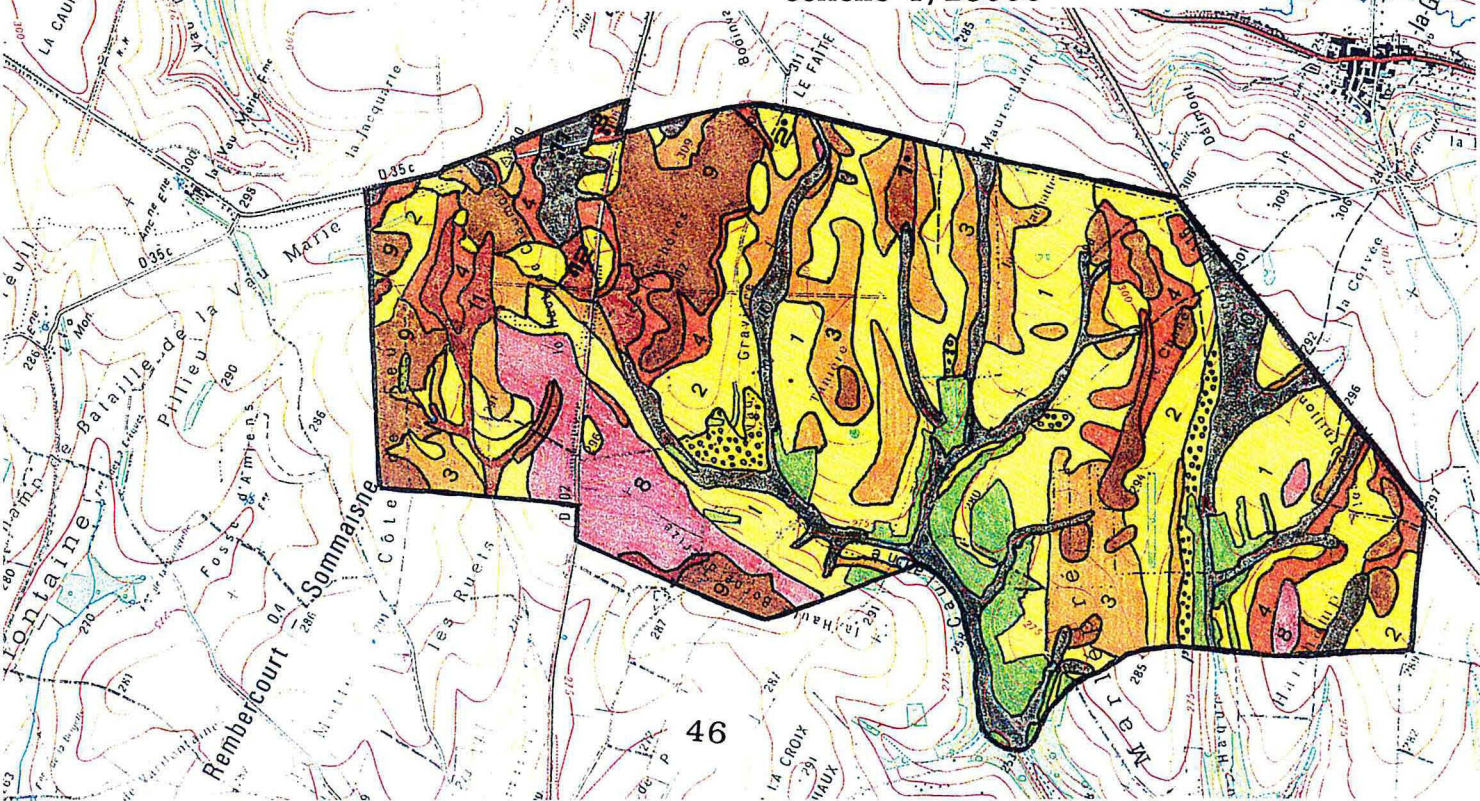
-  12. Sols bruns alluviaux limoneux assez sains
-  13. Sols bruns alluviaux argileux à gley.

AUTRES

-  Forêts 1 n° de l'unité cartographique
-  Décharge 0,1 n° du profil décrit et analysé



CARTE DE SOLS 1
SECTEUR DE REFERENCES DU BARROIS
 échelle 1/25000







CARTE DES SOLS 2

SECTEUR DE REFERENCES DES VOSGES


SOUS-SECTEUR D'UZEMAIN : LA VÔGE

SOLS SUR GRES : sols bruns acides



-  1 sols superficiels (prof < 40 cm)
-  2 sols moyennement profonds (40 cm < prof < 70 cm)
-  3 sols profonds (prof > 70 cm)
-  3' variante légèrement plus riche en éléments fins et un peu hydromorphe

SOLS SUR ARGILES LIE-DE-VIN : sols bruns acides hydromorphes

SOLS SUR ARGILES CARBONATEES

-  4 sols bruns acides hydromorphes à texture limono-argileuse en surface

SOLS SUR GRES ARGILEUX/ARGILES ACIDES

-  5 sols bruns acides hydromorphes à texture limoneuse en surface
-  6 sols bruns acides hydromorphes à texture limono-sablo-argileuse en surface

SOLS D'APPORT :

SOLS COLLUVIAUX DES PENTES FORTES


-  7 sols de profondeur variable et sains

SOLS COLLUVIAUX DES VALLONS


-  8 Sols sains

-  9 sols hydromorphes

SOLS ALLUVIO-COLLUVIAUX DE VALLEE

-  10 sols humifères à gley

-  Bois

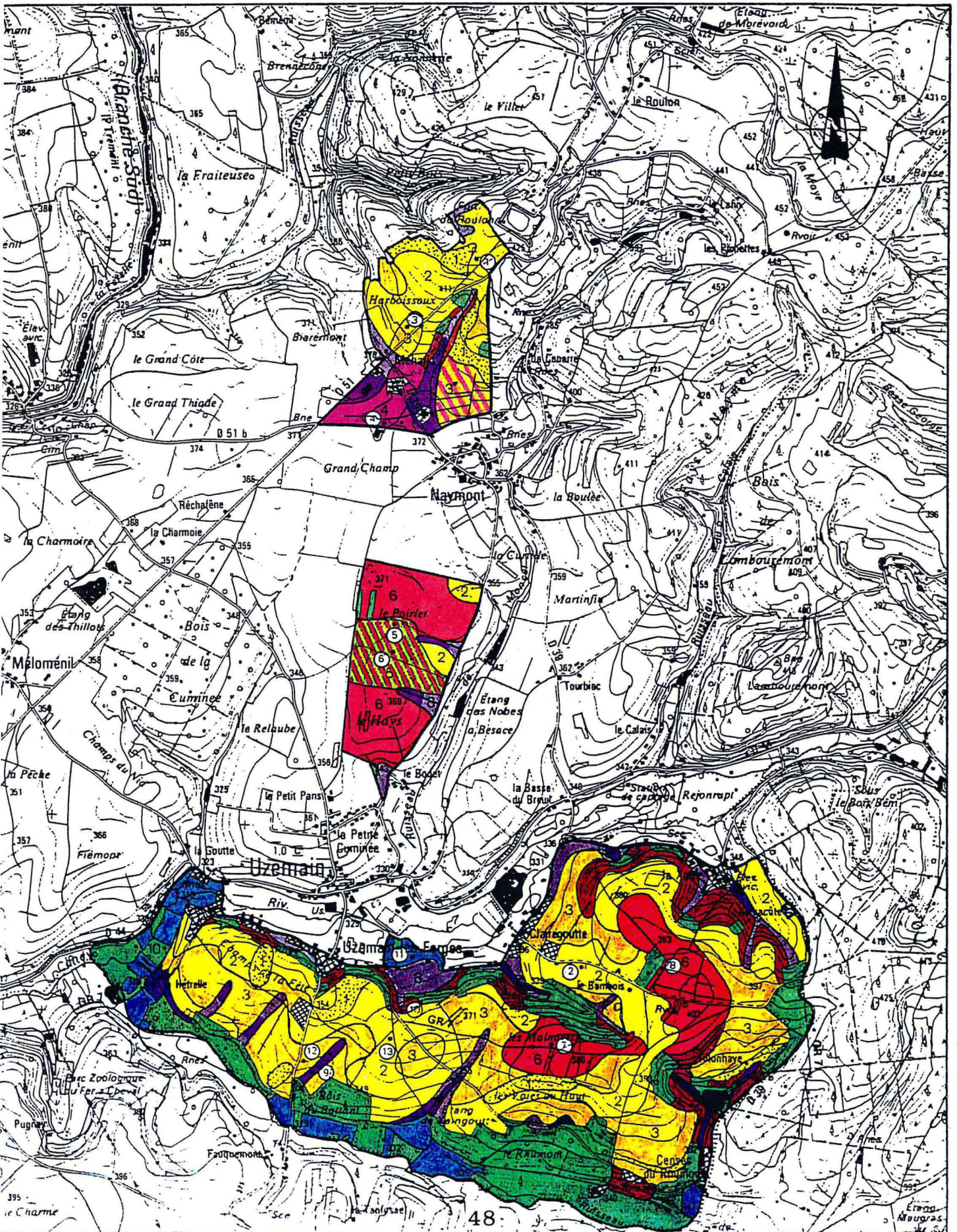
-  Secteur habité et modifié (voisinage des bâtiments)

4 n° de l'unité cartographique

③ n° du profil décrit et analysé

CARTE DES SOLS 2
SECTEUR DE REFERENCES DES VOSGES
SOUS-SECTEUR D'UZEMAIN : LA VÔGE





Echelle 1/25 000






CARTE DES SOLS 2'


SOLS SUR ARENE DE MIGMATITE ET GRANITE :
SOLS BRUNS ACIDES ET BRUNS OCREUX

SOLS D'APPORT : SOLS COLLUVIAUX
DES ZONES BASSES

-  1 sols superficiels (prof < 40 cm)
-  2 sols moyennement profonds (40 cm < prof < 70 cm)
-  3 sols profonds (prof > 70 cm)
-  4 sols bruns ocreux d'altitude moyenne (> 720 m)

-  5 sols colluviaux sains
-  6 sols colluviaux hgdromorphes (incluant des zones plus saines)
-  7 variante de l'unité 6 sur matériaux argilo-limoneux de la plaine de Corcieux

DES PENTES FORTES

-  8 Sols colluviaux sur produits de remaniement de pente

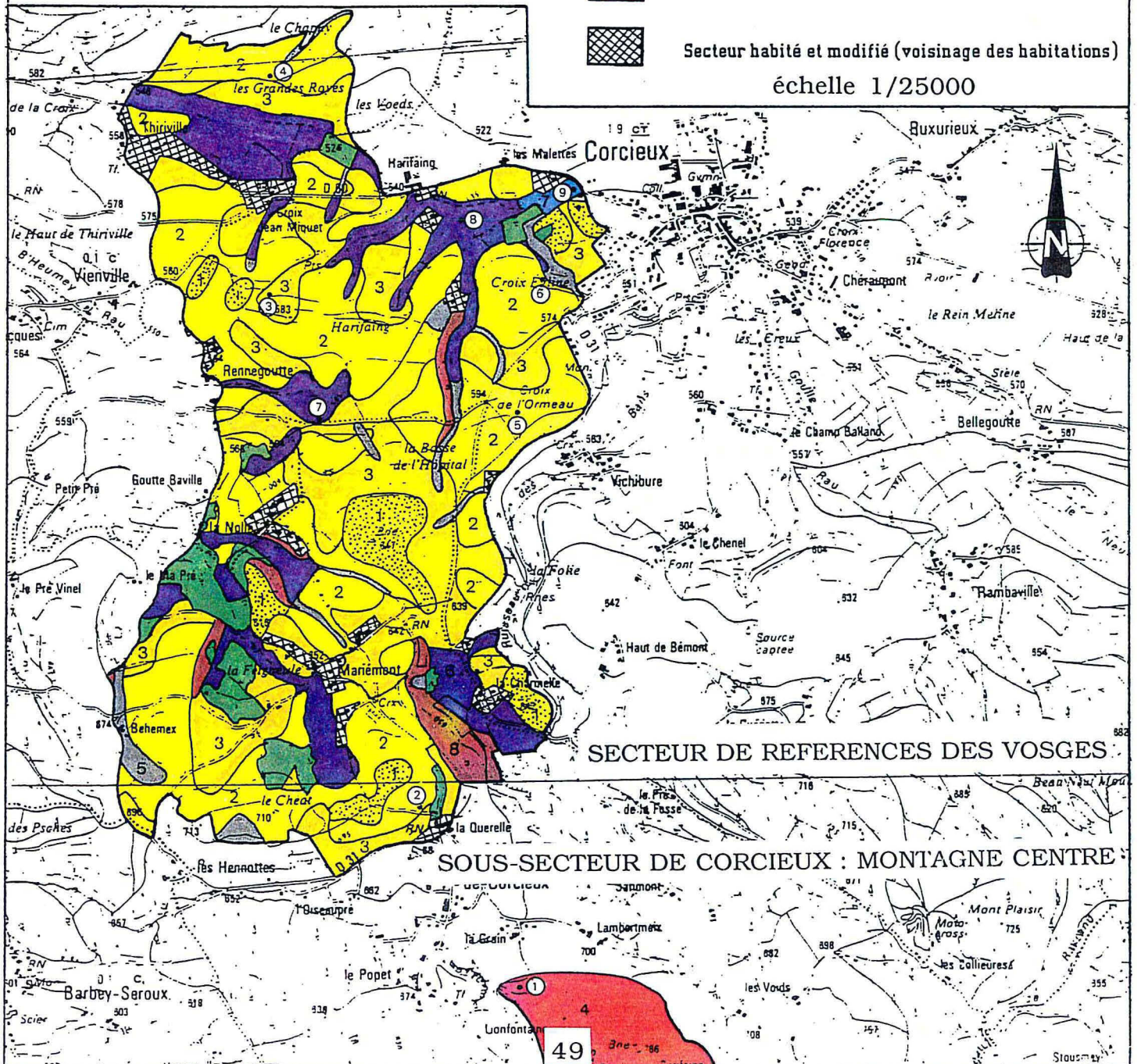
5 n° de l'unité cartographique

③ n° du profil décrit et analysé

 Bois

 Secteur habité et modifié (voisinage des habitations)

échelle 1/25000



3.3.1. CARACTERISATION DES PRINCIPAUX SOLS DES DEUX SECTEURS.

A partir de l'ensemble des unités pédologiques répertoriées et décrites dans les travaux cartographiques, nous avons choisi les cinq sols les plus représentatifs de chaque secteur.

3.3.1.1. Les sols du secteur de références du Barrois (clichés 1 à 5)

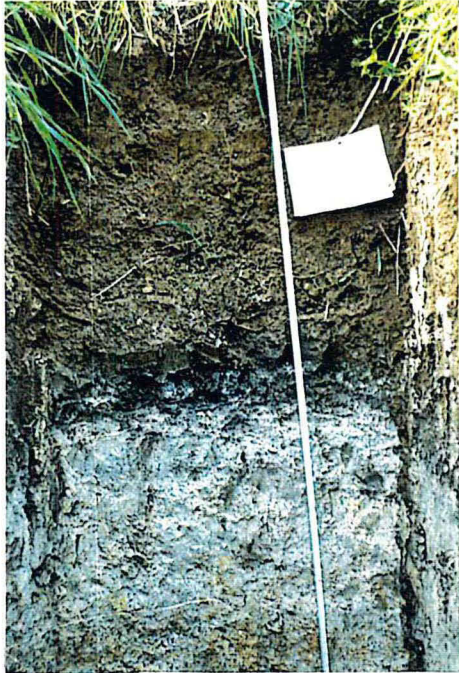
Unité 1). Les sols peu évolués d'apport alluvial, argilo-limoneux, carbonatés, légèrement hydromorphes.

Ils sont localisés dans le lit majeur de l'Aire (plaine inondable) et de ses petits affluents ; ils se situent à proximité du cours de la rivière bénéficiant ainsi d'un exutoire alors que plus loin du cours, l'eau stagne (sols à gley). Le profil 7 représente le profil type (voir annexes I-1), lequel est constitué par un matériau alluvial à texture argilo-limoneuse et carbonaté ; la nappe phréatique est fluctuante mais le sol présente un bon ressuyage. On observe quelques taches oxydées mais peu développées. L'horizon supérieur (A₁) est de teinte assez foncée ; traduisant sa bonne teneur en matière organique ; sa structure grumeleuse est en liaison avec son intense activité biologique.

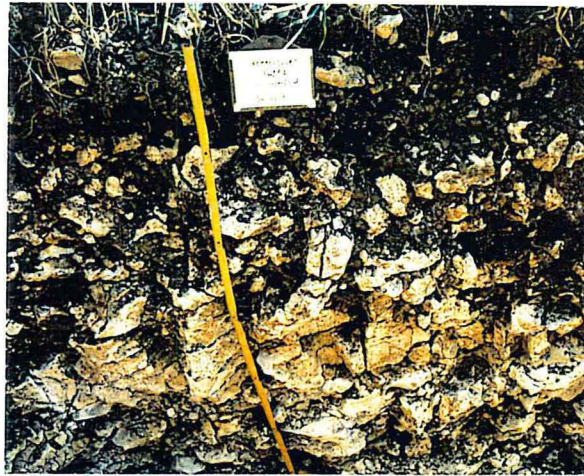
Dans l'horizon sous-jacent (C), l'enracinement est toujours excellent (annexes I-11), car les conditions physico-chimiques sont bonnes : texture équilibrée, présence de cations basiques...

Les strates inférieures correspondent à une autre nature de dépôts alluviaux peu transformés : tout d'abord un niveau IIA₁ assez foncé qui commence à partir de 70 cm de profondeur, puis un horizon IIC à partir de 85 cm, blanchâtre représentant un matériau limoneux, calcaire parfois appelé "tuf". L'hydromorphie est bien sûr de plus en plus importante avec la profondeur mais on n'observe pas de véritable gley.

La fertilité de ces sols est très bonne ; ils bénéficient d'une bonne profondeur, d'une alimentation en eau suffisante et d'une texture équilibrée, mais lorsque la pluviosité est excessive ce bon potentiel ne pourra s'exprimer. Dans ce cas les sols vont être gorgés en eau voire entièrement recouverts par les crues de la rivière. Du fait de cette contrainte, la plaine alluviale de l'Aire est surtout occupée par des prairies naturelles et des peupleraies.



Cliché 1 : FLUVIOSOL TYPIQUE
argilo-limoneux



Cliché 2 : RENDOSOL
argilo-limoneux



Cliché 3 : CALCOSOL
argilo-limoneux



Cliché 4 : CALCISOL argileux



Cliché 5 : NEOLUVISOL
limono-argileux

SECTEUR DE REFERENCES DU BARROIS

Unité 2). Les sols carbonatés modaux, argilo-limoneux, superficiels, caillouteux (rendzines modales).

Ce type de sol est bien représenté dans les deux sous-secteurs. Il est très carbonaté du fait de la nature de la roche-mère affleurante qui libère du calcaire fin (voir le profil type No. 9 en annexe I-2). Ce sol a un profil du type Ap/C du fait de la proximité du substratum où se dessinent nettement les alternances de bancs calcaires et de couches marneuses grisâtres. Les cailloux sont abondants (entre 30 et 50 % en volume). La profondeur réelle de ce type de sol est difficile à cerner car le substrat est fortement fissuré et les racines des cultures colonisent facilement la terre se trouvant entre les fissures (voir cliché 1 et profil racinaire en annexe I-11), ceci pose le problème des horizons entraînés dans les roches plus ou moins karstiques. Le faible volume de terre disponible pour les racines induit deux conséquences préjudiciables : le stock en éléments nutritifs est faible (phénomène compensé par une bonne C.E.C.) et la réserve en eau utile est réduite (sols sensibles à la sécheresse). Pour la nutrition minérale dans le cas spécifique du phosphore ce type de sol exerce un fort pouvoir fixateur.

Unité 3). Les sols bruns calcaires hydromorphes, argilo-limoneux, sur marnes.

Ces sols se répartissent suivant plusieurs bandes assez étroites épousant assez fidèlement les courbes de niveau et reflétant les affleurements marneux du Kimméridgien moyen et supérieur (voir carte des sols). Les terres présentent des nuances grisâtres dominantes et comportent une multitude de coquilles fossilisées (*Exogyra virgula*) localement appelées "oreilles de souris". De loin on peut repérer ces zones par l'apparition très souvent à leur limite supérieure de lignes de mouillères qui traduisent les sorties d'eau venant des calcaires filtrants sus-jacents. L'eau est arrêtée par le substrat marneux imperméable. Le profil type est constitué par la fosse 4 (voir annexe I-3). Les textures sont argilo-limoneuses, le sol est très carbonaté et de teinte grisâtre ou olivâtre. On reconnaît la succession des horizons suivants : Ap-(B)-Cg. Dans l'horizon Ap il y a une activité biologique moyenne et une structure à grumeaux anguleux. Les conditions se dégradent au niveau de l'horizon suivant (B) dont la structure est massive et la densité apparente élevée ; des taches d'hydromorphie y sont présentes. Dans

l'horizon C l'hydromorphie est plus apparente ; on distingue aussi des blocs calcaires plus ou moins altérés.

Ces sols sont très sensibles aux conditions d'humidité extrêmes (sécheresse, excès d'eau) ; ce sont des sols superficiels, l'enracinement s'arrête avant 50 cm de profondeur, du fait de la présence de la roche-mère marneuse (voir cliché 1 et profil d'enracinement en annexe I-11). L'horizon de culture se travaille difficilement. La capacité de rétention pour le phosphore est élevée. Ces sols sont localisés sur les coteaux du Kimméridgien dont la pente sera un facteur limitant pour la production agricole.

Unité 4). Les sols bruns calciques épais, argileux.

Ce type de sol est surtout présent sur le plateau calcaire du sous-secteur du Portlandien. Ce sont des sols argileux assez profonds (plus de 50 cm) ; on les trouve dans des zones où les pierres en surface sont rares. La couleur caractéristique de ces sols est brun-rougeâtre, indice de la présence de fer (sols localement appelés "terres rouges" correspondant à la "terra fusca" des pédologues). Le profil type est représenté par le profil 3 (voir annexe I-4). Tout d'abord on constate un développement de celui-ci jusqu'à une soixantaine de centimètres ; puis on passe au substratum rocheux (bancs calcaires), très disloqué avec des joints argileux pénétrables par les racines (horizon C). Le surcroît d'épaisseur par rapport aux rendzines correspond à la présence d'un horizon (B) à structure polyédrique avec un taux d'argile élevé (60%). La transition est nette avec l'horizon de culture Ap, lui aussi de texture argileuse et à structure à grumeaux anguleux, saturé en calcium et avec une bonne teneur en matière organique. Le front de carbonatation se trouve à la base de (B) ; en effet, à part C, aucun horizon ne fait effervescence à l'acide. Aucun signe de lessivage ni d'hydromorphie n'est notable. La proportion des éléments grossiers tombe à 3 % ; ils ne sont plus une contrainte pour le travail du sol.

Ces sols ont une capacité de ressuyage satisfaisante, une bonne stabilité structurale et un bon environnement ionique. La réserve utile en eau et la profondeur d'enracinement sont moyennes (voir profil racinaire en annexe I-11). Les variations de ce type de sol sont liées surtout à la profondeur du profil.

Unité 5). Les sols bruns faiblement lessivés, limono-argileux.

Ces sols se trouvent sur le plateau calcaire du sous-secteur du Portlandien, et se répartissent avec peu de logique sur des placages limoneux peu étendus d'origine éolienne. Leur localisation est relativement facile à préciser, leur couleur jaunâtre claire se détache nettement des "terres rouges" avoisinantes.

Le profil type est matérialisé par la fosse 1 (voir annexe I-5), avec la succession des horizons suivants : Ap-Btg-C. La croûte de battance en surface témoigne du déséquilibre de la texture (72 % de limon pour 20 % d'argile). L'augmentation brutale et significative du pourcentage d'argile en B (57 %), du fait du lessivage mécanique des argiles et du fer des horizons supérieurs, forme un Btg marqué par l'hydromorphie (marmorisation). Cet horizon est donc moins perméable. Cependant, l'hydromorphie temporaire ne sera jamais très importante étant donné la perméabilité de la dalle calcaire sous-jacente. L'horizon Ap ne présente pas une bonne structure : il se découpe en assez gros polyèdres peu favorables à l'activité biologique. Dans l'horizon Btg la structure est à tendance prismatique du fait du taux d'argile.

Ces sols sont des bons sols agricoles malgré les handicaps structuraux du premier horizon. La profondeur d'enracinement et la réserve utile en eau sont très bonnes (voir profil d'enracinement en annexe I-11) ; néanmoins, il faut des apports réguliers d'éléments nutritifs car la C.E.C. (pouvoir de stockage) est faible (10 meq 100⁻¹ g de sol). Le travail du sol est facile mais la prédisposition à la battance est à surveiller.

3.3.1.2. Les sols du secteur de références des Vosges (clichés 6 à 10)

Unité 6). Les sols bruns acides profonds, sablo-argileux, sur grès.

Ces sols se localisent sur les faibles pentes des collines et sur les sommets du sous-secteur d'Uzemain, mais sans que cette corrélation soit pour autant une règle. Ce sont les sols les plus représentatifs de ce sous-secteur ; la roche-mère est le grès du Buntsandstein. Le profil type est constitué par le profil 3b (voir annexe I-6). Il montre la succession typique des trois horizons d'un sol brun acide : Ap-(B)-C. L'horizon Ap a une texture sablo-argileuse ; il comporte quelques

cailloux de grès, il n'a pas de véritable structure (structure particulière) et il est facile à émietter à la main. On observe une granulation biologique au niveau de la rhizosphère. L'horizon (B) à texture sablo-argileuse est surtout marqué par l'existence de conduits humifères dont la couleur plus foncée ressort légèrement sur le brun-jaunâtre de la matrice ; le taux de matière organique de cet horizon ne traduit pas cette différenciation visuelle (l'échantillon a été obtenu après mélange de l'ensemble). Il y a légère accumulation d'argile sans pour autant constituer un Bt ; la structure ne change pas par rapport à l'horizon Ap. Un mélange de sable ocre, de cailloux et de blocs résultant de la désagrégation du grès sous-jacent forme l'horizon C.

Les caractéristiques physico-chimiques d'un tel type de sol ne sont pas favorables aux cultures ; elles génèrent une contrainte incontournable : la faible capacité de rétention pour l'eau et les éléments nutritifs ; il faut maintenir un bon taux humique pour atténuer ces problèmes. La C.E.C. est très faible dans tout le profil avec une saturation en bases moyenne ; les fertilisants minéraux apportés peuvent donc être perdus facilement. Les sols sont acides et il est nécessaire d'apporter régulièrement des amendements calcaires. La texture sableuse donne des sols "légers" faciles à travailler et qui se ressuint facilement.

Unité 7). Les sols bruns acides profonds, argilo-limoneux, légèrement hydromorphes, sur argiles carbonatées.

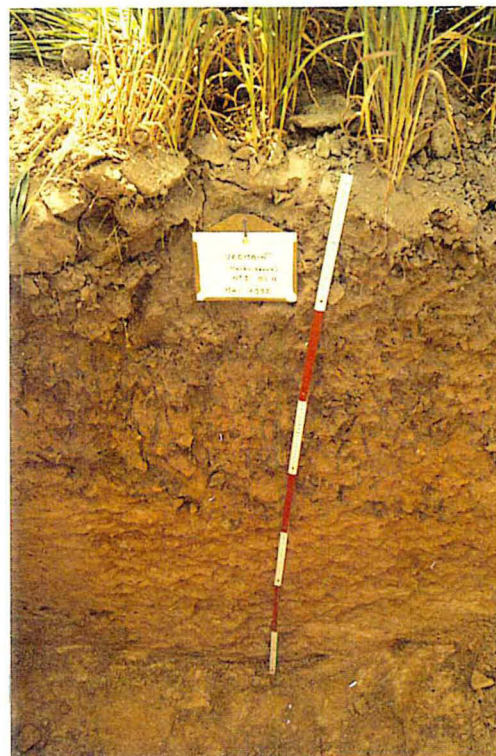
Ces types de sols se trouvent seulement sur une petite surface dans le sous-secteur d'Uzemain. Ils se différencient facilement des sols sur grès sableux, par leur couleur rouge "lie-de-vin" et leur texture plus argileuse (argiles du Muschelkalk). Leur différenciation par rapport aux sols sur argiles acides est basée sur la réaction à HCl de l'argile sous-jacente. Le profil type est le numéro 4b (voir annexe I-7). Il est difficile de distinguer les différents horizons, mais on peut reconnaître cependant, l'horizon (B) qui se différencie par un moindre taux en matière organique, une plus faible activité biologique et donc une moins bonne structure. Ce deuxième horizon, fait peu à peu place, vers 60-70 cm, à l'argile non (ou peu) altérée (horizon C) ; l'enracinement s'y arrête (annexe I-12). La couleur "lie-de-vin" caractéristique peut être mélangée avec des couches d'argile gris-verdâtre. Du fait des particules fines



Cliché 7 : BRUNISOL MESOSATURE
argilo-limoneux



Cliché 8 : BRUNISOL MESOSATURE
limono-argileux



Cliché 6 : BRUNISOL
MESOSATURE
sablo-argileux



Cliché 9 : ALOCRISOL TYPIQUE
moy. profond sableux



Cliché 10 : ALOCRISOL TYPIQUE
profond sableux

SECTEUR DE REFERENCES DES VOSGES

dominantes, ces sols sont gorgés en eau durant les périodes pluvieuses (les signes d'hydromorphie ne sont pas facilement observables masqués par la couleur rouge du matériau originel). Ces sols sont utilisés surtout en prairies car les textures ne facilitent pas les labours et les reprises. La nécessité d'un assainissement est prioritaire dans ces sols ; le pH des deux premiers horizons reste acide (de l'ordre de 6) ; en profondeur il est alcalin (de 7,3 à 8,3) ; la C.E.C. reste faible.

Unité 8). Les sols bruns acides profonds, limono-argileux, hydromorphes, sur grès et argiles acides.

Ils sont localisés dans le sous-secteur d'Uzemain au niveau des replats sommitaux. On les distingue facilement des sols bruns acides sur grès par la couleur rougeâtre ; il est plus difficile de les distinguer des sols précédents sauf par l'augmentation des critères d'hydromorphie et le manque de réaction à HCl. Le profil type (profil 7b en annexe I-8), montre les caractéristiques suivantes : Un horizon Ap à texture limono-argilo-sableuse ou limono-argileuse, avec une structure développée seulement au niveau de la rhizosphère ; la tendance à la battance est évidente en surface. Puis vient l'horizon (B) à peine plus argileux (texture limono-argileuse), à structure fondue et qui présente des signes d'hydromorphie (taches rouille). Le substratum apparaît vers 60 cm, c'est une argile "lie-de-vin" à pH de 4,7 mêlée de blocs de grès violacés. Ce type de sol présente comme constante : un travail difficile du sol, l'asphyxie du milieu et l'instabilité structurale de l'horizon Ap. Il peut se produire un tassement de cet horizon de culture (consécutif à un mauvais travail du sol) avec stagnation d'eau en surface. Le pH est acide dans tout le profil et la C.E.C. est faible. Les besoins d'apports de matières organiques et calcium sont évidents.

Unité 9). Les sols bruns acides moyennement profonds, sableux, sur migmatites.

Ces sols sont prédominants dans le sous-secteur de Corcieux où ils se retrouvent à presque tous les niveaux du relief, ils sont très mêlés à des sols plus superficiels sans qu'il y ait un indice géomorphologique explicatif, donc leur différenciation cartographique demeure difficile (cf. carte des sols 2) . Dans le profil type (profil 2 en annexe I-9) nous voyons que la profondeur du sol se limite à 40-50 cm car, à ce niveau,

apparaît le substratum désagrégé comprenant un mélange de sables (arènes), graviers, cailloux et blocs de migmatite. Les racines ont peu de volume disponible, elles atteignent une densité maximale en Ap, moindre dans l'horizon (B) et peuvent arriver à se "faufiler" dans les matériaux grossiers sous-jacents (c.f. profil racinaire en annexe I-12). Les textures sont sableuses et la structure n'existe qu'au niveau de la rhizosphère. L'horizon (B) possède de nombreuses lignes verticales humifères qui matérialisent le parcours de racines et/ou de lombrics. Il peut y avoir entraînement mécanique de matière organique dans ce milieu très filtrant, mais il n'est pas décelable par les analyses pratiquées.

Ces sols ne sont pas très favorables aux cultures car ils sont pénalisés par la capacité de rétention en éléments fertilisants et en eau ; ce dernier handicap est amoindri par la pluviosité élevée du sous-secteur. Le pH est acide dans tout le profil et la C.E.C. faible (avec un S/T également faible) ; il faudrait apporter des amendements organiques et calciques régulièrement. Le travail du sol est facile et il n'y a pas de problèmes de ressuyage.

Unité 10). Les sols bruns acides profonds, sableux, sur migmatites.

Ce sont des sols très proches des précédents et localisés un peu partout dans le sous-secteur. Le profil type est le numéro 3c (annexe I-10). Leurs caractéristiques sont similaires aux sols de l'unité précédente mais la profondeur peut atteindre de 80 à 90 cm. Leurs contraintes sont les mêmes que celles des sols précédents, mais la réserve utile en eau et la profondeur d'enracinement sont plus élevées (annexe I-12).

3.3.2. CLASSIFICATION "NATURELLE" DES PRINCIPAUX SOLS DES DEUX SECTEURS.

Dans le tableau 3.1 sont présentés les noms des dix sols représentatifs des deux secteurs en accord avec les 4 classifications de sols utilisées. Notre but est de définir les noms des sols selon les classifications les plus utilisées par les pédologues, afin de faciliter l'échange d'informations et de résultats au niveau des potentialités ; il

n'est pas question dans cette étude de discuter des avantages ou des inconvénients d'un système par rapport à un autre. Il faut signaler que les noms de sol donnés par la classification américaine ont été traduits en français en s'inspirant du Dictionnaire de Science du Sol (Lozet et Mathieu, 1990) et de la version française de la "soil taxonomy" (Soil Survey Staff, 1986).

Notons cependant quelques différences entre les deux systèmes français en raison des différents principes de base de chacun ; en effet, pour la classification française (C.P.C.S., 1967), la dénomination du sol est liée à sa genèse, tandis que le Référentiel Pédologique privilégie le type d'horizon diagnostique défini davantage pour ses caractéristiques physico-chimiques et morphologiques (A.F.E.S., 1992).

Dans le cas des deux classifications à base statistique : la "Soil Taxonomy" et la FAO-UNESCO, elles sont étroitement liées, avec cependant une approche plus générale du système FAO (Duchaufour, 1991). Rappelons que la FAO est surtout une légende pour la carte des sols du monde, tandis que la classification américaine, a été créée pour les sols des Etats Unis (Soil Survey Staff, 1975) ; les échelles sont donc très différentes, bien que les principes de base soient similaires.

Par rapport aux différents types de sols repertoriés dans chaque secteur, les quatre systèmes donnent des noms de sols différents pour les sols du Barrois ; pour les sols des Vosges cette différenciation n'est pas aussi nette pour la classification FAO ; pour les autres classifications la différenciation se situe uniquement au niveau des catégories inférieures : La série pour la classification C.P.C.S., les qualificatifs pour le Référentiel Pédologique et les sous-goupes ou la famille pour la "Soil Taxonomy". Cette faible diversité est due à l'homogénéité de la roche-mère des sous-secteurs des Vosges.

Lors de la dénomination des sols nous avons rencontré quelques problèmes ; ainsi, dans le cas du Référentiel Pédologique, les sols du sous-secteur de Corcieux (unités 9 et 10), présentent des caractéristiques qui permettent de différencier un horizon B aluminique (S al) : des teneurs élevées en aluminium "libre" et total, et un taux de saturation en bases (S/T) inférieur à 20%. Cependant le pH eau de cet horizon est supérieur à 5 et l'horizon de labour est modifié par la culture, montrant des S/T supérieurs à 50% et un pH autour de 6 ; ces dernières caractéristiques pouvant nous permettre de les classer comme BRUNISOLS OLIGO-SATURES. Néanmoins, du fait des

caractéristiques plus permanentes de l'horizon B, nous avons choisi de les classer comme ALOCRISOLS TYPIQUES.

D'autre part, les unités 6, 7 et 8 ont été classées comme sols bruns acides dans le système C.P.C.S. (1967), bien qu'ayant des pH plus élevés que 5,5 dans les horizons supérieurs ; nous avons considéré que ces valeurs de pH étaient la conséquence de la mise en culture et de l'apport d'amendements calciques ; nous avons donc désigné ces sols par le terme de sol brun acide de culture.

Par ailleurs l'unité 3 du Barrois classé comme Eutrochrepts dans la "Soil Taxonomy", montre des caractéristiques hydromorphes et des taux en CaCO_3 actifs élevés ; les clés de la taxonomie des sols présentent respectivement deux sous-groupes séparés correspondant à ces caractéristiques : sous-groupes aquique et rendollique. Pour ne pas négliger une de ces deux caractéristiques importantes pour la définition des potentialités des sols, nous avons choisi d'ajouter un sous-groupe faisant intervenir les deux adjectifs : sous-groupe aquique rendollique.

Actuellement le Référentiel Pédologique est sensé remplacer l'ancienne classification française, aussi nous utiliserons dans la suite de ce mémoire pour les études à grande échelle les appellations de ce Référentiel ; pour des questions pratiques nous rappellerons dans certains cas uniquement le numéro de l'unité considérée.

Tableau 3.1 : classification "naturelle" des sols des deux secteurs de références

Unités cartographiques*	Classification française. C.P.C.S 1967	Classification française : Référentiel Pédologique (A.F.E.S., 1992)	Classification américaine : "Soil Taxonomy" (Soil Survey Staff, 1992)	Légende de la carte mondiale des sols (F.A.O., 1989)
1	Sol alluvial peu évolué argilo-limoneux carbonaté légèrement hydromorphe	FLUVIOSOL TYPIQUE argilo-limoneux, calcaire, rédoxique, à nappe, cultivé	Udfluvent mollique ; argileux-mixte-mésique	Fluvisol gleyi-calcaire
2	Rendzine modale argilo-limoneuse superficielle callouteuse	RENDOSOL argilo-limoneux, issu de bancs calcaires du Kimméridgien, cultivé	Rendoll lithique ; argileux squelettique - carbonaté-mésique	Leptosol rendzique
3	Sol brun calcaire hydromorphe argilo-limoneux sur marnes	CALCOSOL argilo-limoneux à ressuyage ralenti, rédoxique, issu de marnes du Kimméridgien, cultivé	Eutrochrept aquique rendollique ; limoneux fin-carbonatique - mésique	Cambisol gleyi-calcaire
4	Sol brun calcique épais argileux	CALCISOL argileux, saturé, issu de bancs calcaires du Portlandien, cultivé	Eutrochrept typique ; argileux très fin - mixte - mésique	Cambisol luvi-chromique
5	Sol brun faiblement lessivé limono-argileux sur limons	NEOLUVISOL limono-argileux, eutrique, rédoxique, issu de placage limoneux éoliens sur calcaire du Portlandien, cultivé	Hapludalf typique ; argileux - mixte - mésique	Luvisol ferri-haplique
6	Sol brun acide de culture profond sablo-argileux sur grès	BRUNISOL MESOSATURE sablo-argileux, pachique, luviq, issu de grès du Buntsandstein, cultivé	Eutrochrept dystrique ; loameux grossier - mixte - mésique	Cambisol luvi-eutrique
7	Sol brun acide de culture profond argilo-limoneux légèrement hydromorphe sur argiles carbonatées	BRUNISOL MESOSATURE argilo-limoneux, pachique, saturé en surface, issu des argiles carbonatées du Muschelkalk, sous prairie	Eutrochrept typique ; loameux fin - mixte - mésique	Cambisol gleyi-chromique
8	Sol brun acide de culture profond limono-argileux hydromorphe sur grès et argiles acides	BRUNISOL MESOSATURE limono-argileux, pachique, rédoxique, issu des argiles du Buntsandstein, cultivé	Eutrochrept aquique dystrique ; loameux fin - mixte - mésique	Cambisol chromi-gleyique
9	Sol brun acide moyennement profond sableux sur migmatites	ALOCRISOL TYPIQUE sableux, humifère, ocreux, issu des migmatites de Gerbépal, cultivé	Dystrochrept umbrique ; loameux grossier - mixte mésique	Cambisol areni-dystrique
10**	Sol brun acide profond sableux sur migmatites	ALOCRISOL TYPIQUE sableux, pachique, humifère, ocreux, issu des migmatites de Gerbépal, sous prairie	Dystrochrept umbrique; loameux grossier - mixte - mésique	Cambisol areni-dystrique

* Les unités de 1 à 5 correspondent au secteur de références du Barrois et celles de 6 à 10 au secteur de références des Vosges

** Ce sol est différencié de l'unité 9 seulement par la profondeur

3.4. ESSAIS D'EVALUATION DES POTENTIALITES DES SOLS

Les potentialités agronomiques des sols ne peuvent être abordées indépendamment des conditions climatiques, des systèmes de cultures et des conditions socio-économiques. Cependant, le sol posséderait, pour une utilisation actuelle donnée, une valeur intrinsèque indépendamment du climat ; nous pouvons donc, utiliser des critères permanents du sol pour établir un jugement sur l'aptitude agricole actuelle d'un sol donné ; aussi, nous essayerons d'évaluer les potentialités agricoles des sols par rapport à un système de culture donné, soumis à un climat donné.

Dans un premier temps nous présenterons les deux approches analytiques (système de 8 classes et approche Région Centre de la France), puis un essai d'appréciation globale (rendements ponctuels). Rappelons que les deux premières approches utilisent le concept de potentialité culturelle (PC) ou aptitude culturelle actuelle et le troisième le concept de potentialité agricole (PA) ou aptitude culturelle potentielle.

3.4.1. L'EVALUATION DES APTITUDES AGRICOLES DES SOLS (SYSTEME AMERICAIN DE 8 CLASSES)

Nous rappellerons ici quelques principes de cette méthode utilisée surtout par le service de conservation des sols du Département d'Agriculture des Etats Unis (Klingebiel et Montgomery, 1961 ; I.M.T.A., 1988). Ce système prend en compte cinq critères majeurs de classification, à savoir : l'érosion, le drainage, la topographie, le sol et le climat. Chaque critère est sous-divisé en différents facteurs quantitatifs et qualitatifs, l'intensité desquels détermine la classe d'aptitude agricole. Le système possède 8 classes hiérarchiques, les classes I à IV étant conseillées pour les cultures, les classes V et VI pour le pâturage, la classe VII pour les forêts et la VIII pour les réserves de la vie sauvage ou le tourisme. Le critère le plus pénalisant détermine la classe d'aptitude (voir les critères de classification en annexe I-13). C'est une méthode basée sur l'inventaire et le classement des contraintes par rapport à la production de grandes cultures et sans considérer une culture en particulier, son but principal est de fournir des renseignements pour l'aménagement du territoire, à l'échelle de cette grande Nation.

Les résultats obtenus à partir de cette classification pour les dix sols apparaissent dans le tableau 3.2.

On ne trouve pas de sols de classe I. Certains classificateurs réduisent le nombre de facteurs limitants aux trois principaux quand on travaille à petite et moyenne échelle (IMTA, 1988), mais dans le cadre de notre travail et à l'échelle des secteurs de références agropédologiques nous avons inclus tous les facteurs limitants répertoriés.

Les sols de classe II

Ce sont les sols ayant la meilleure aptitude agricole des deux secteurs. Cette classe est constituée par le FLUVIOSOL TYPIQUE, le CALCISOL et le NEOLUVISOL du secteur du Barrois (respectivement unités 1, 4 et 5). Ces sols ont quelques limitations qui réduisent légèrement la gamme des cultures possibles. Ils sont pénalisés par, les risques d'inondation et la présence d'une nappe phréatique pour le FLUVIOSOL TYPIQUE, la pierrosité dans le profil et la texture argileuse pour le CALCISOL et la faible fertilité potentielle pour le NEOLUVISOL (Rappelons que pour cette classification le terme fertilité potentielle se réfère seulement à la valeur de la C.E.C.).

Les sols de classe III.

Ce sont : le RENDOSOL du Barrois, le BRUNISOL MESOSATURE sableux et le BRUNISOL MESOSATURE argileux du sous-secteur d'Uzemain (respectivement unités 2, 6 et 7). Le RENDOSOL est pénalisé surtout par la profondeur du sol et la pierrosité en surface et dans le profil. Les deux autres ont comme facteur limitant commun la profondeur exploitable par les racines et la fertilité potentielle ; en plus, ils sont pénalisés par, la texture sablo-limoneuse et la perméabilité élevée pour l'unité 6, la texture argileuse (plastique) et la perméabilité faible pour l'unité 7 (les facteurs limitants sont les mêmes mais leur intensité varie). Ces sols présentent des limitations sévères pour les cultures, en rendant plus difficile les techniques culturales.

Tableau 3.2 : Classification des potentialités des sols selon la méthode américaine de 8 classes (I.M.T.A., 1988)

SOLS	CLASSES	FACTEURS LIMITANTS
1 FLUVIOSOL TYPIQUE	II D ₂ D ₃	Inondation (<3 fois par an et <24 h) ; nappe phréatique (entre 100 et 150 cm pour <3 mois cumulatifs)
2 RENDOSOL	III S ₂ S ₅ S ₆ S ₁ T ₁	Profondeur exploitable par les racines (50-100cm) ; pierrosité dans le profil (35- 60 %) ; pierrosité superficielle (<20 %) ; texture argileuse et topographie (pente 2-5 %)
3 CALCOSOL	VI S ₂ D ₄ T ₁ S ₁	Profondeur exploitable par les racines (25-50 cm) ; drainage (perméabilité trop faible) ; topographie (pente 2-7 %) ; texture limoneuse (battance)
4 CALCISOL	II S ₅ S ₁	Pierrosité dans le profil (15-35 %) ; texture argileuse
5 NEOLUVISOL	II S ₈	Fertilité potentielle (CEC 16-24)
6 BRUNISOL MESOSATURE sableux	III S ₂ S ₈ S ₁ D ₄	Profondeur exploitable par les racines (50-100 cm) ; fertilité potentielle (CEC<16) ; texture sablo-limoneuse ; perméabilité moyennement élevée
7 BRUNISOL MESOSATURE argileux	III S ₂ S ₈ S ₁ D ₄	Profondeur exploitable par les racines (50-100 cm) ; fertilité potentielle (CEC<16) ; texture argileuse très plastique en profondeur ; perméabilité faible
8 BRUNISOL MESOSATURE limoneux	IV D ₄ S ₂ S ₈ S ₁	Perméabilité élevée ; profondeur exploitable par les racines (50-100 cm) ; fertilité potentielle (CEC<16) ; texture limoneuse (structuration massive)
9 ALOCRISOL TYPIQUE moy. profond	IV D ₄ S ₂ S ₁ S ₈ T ₁	Perméabilité élevée ; profondeur exploitable par les racines (50-75 cm) ; texture sablo-limoneuse ; fertilité potentielle (CEC<16) ; topographie (pente 4-7 %)
10 ALOCRISOL TYPIQUE profond	IV D ₄ S ₂ S ₁ S ₈ T ₁	Perméabilité élevée ; profondeur exploitable par les racines (75-100 cm) ; texture sablo-limoneuse ; fertilité potentielle (CEC<16) ; topographie (pente 2-4%)

Les sols de la classe IV

Nous trouvons dans cette classe les BRUNISOLS MESOSATURES à texture limoneuse et les ALOCRISOLS TYPIQUES moyennement profonds et profonds (respectivement unités 8, 9 et 10). Les facteurs limitants de ces différents sols sont variés ; ainsi le BRUNISOL MESOSATURE limoneux est pénalisé par sa faible perméabilité, profondeur d'enracinement, fertilité potentielle et par sa tendance à la battance. D'autre part les deux ALOCRISOLS sont surtout pénalisés par leur perméabilité élevée (faible capacité de rétention en eau), faible fertilité potentielle, et position de pente. Ils sont pénalisés de la même façon en ce qui concerne le critère profondeur, bien que cette profondeur soit différente. Ces sols peuvent être utilisés pour un ensemble de cultures très limité.

Les sols de la classe VI

La plus mauvaise classe d'aptitude correspond au CALCOSOL sur marnes : unité 3 (Rappelons qu'il s'agit d'une lithologie aux faciès argileux) ; ce sol a été pénalisé par, sa faible profondeur exploitable par les racines, ses problèmes de drainage, sa position topographique et sa structure compacte liée à la texture argilo-limoneuse. Ces sols ont des limitations sévères et même s'ils sont actuellement cultivés, seraient généralement inaptes pour les cultures selon le manuel de classification.

Discussion

Les sols les plus conseillés pour l'agriculture intensive sont représentés par les classes II et III ; les sols marginaux sont ceux de la classe IV, les sols de la classe VI ne doivent pas être mis en culture mais doivent être maintenus en pâturage.

Les principaux facteurs limitants pénalisant les sols des deux secteurs sont : la profondeur exploitable par les racines (S_2) pour les unités 2, 3, 6, 7, 8, 9 et 10 ; la perméabilité faible (D_4) pour les unités 3, 7 et 8 et la perméabilité élevée (D_4) liée aux textures sableuses pour les unités 6, 9 et 10. La fertilité potentielle (S_8) liée à la faible C.E.C. a été un facteur limitant commun pour tous les sols du secteur des Vosges et pour le NEOLUVISOL du secteur du Barrois (unités 5 à 10).

La texture (S₁) soit argileuse soit sableuse a joué pour presque toutes les unités de sols, mais seulement comme facteur limitant secondaire. Les risques d'inondations et la présence d'une nappe phréatique sont seulement mentionnés comme facteur limitant pour le FLUVIOSOL.

Par ailleurs, le NEOLUVISOL, le FLUVIOSOL et le CALCISOL sont les sols avec les moindres facteurs limitants ; dans le cas du NEOLUVISOL la fertilité potentielle est le seul facteur limitant.

A noter que l'érosion et le climat n'ont été signalés comme des facteurs limitants pour aucun sol.

A partir de cet essai nous pouvons mentionner que :

- les paramètres de différenciation des classes concernant le facteur climat sont trop grands à l'échelle de la petite région naturelle, car ils ne permettent pas, par exemple, la séparation des sols du sous-secteur de Corcieux de tous les autres.

- l'effet du manque de structure de certains sols (exemple les sols battants et les sols sableux massifs), n'apparaît pas dans cette classification ; pourtant il peut être très limitant pour certaines cultures d'été.

- l'état organique des sols et le taux de carbonates ne sont pas pris en compte.

- Il faudrait compléter les paramètres de classification pour définir la fertilité potentielle (C.E.C.) et prendre en compte notamment le taux de saturation (S/T) et le pH des sols.

3.4.2. L'EVALUATION PARAMETRIQUE DE LA VALEUR CULTURALE DES SOLS (APPROCHE REGION CENTRE DE LA FRANCE).

En l'absence d'un système d'évaluation paramétrique opérationnel en Lorraine, nous avons utilisé une méthode additive proposée pour le classement des sols de la Région Centre de la France à l'échelle 1/50000^e (Lafrechoux *et al*, 1983). Rappelons quelques principes de base de cette approche. Cette méthode nous permet de hiérarchiser l'aptitude culturelle actuelle du sol par un nombre de points variables pour chaque type de sol ; ce total de points est obtenu par l'addition de notes correspondant à chacun des sept critères pédologiques considérés : un très bon sol sans facteurs limitants obtiendrait 100 points. Les critères ou paramètres pris en compte par

ordre d'importance sont : la texture (25 points), l'hydromorphie (20 points), la profondeur exploitable par les racines (15 points), l'état calcique et organique de la couche arable (15 points), la réserve utile en eau (10 points), la charge en éléments grossiers (10 points) et la teneur en carbonates (5 points). Le détail de la notation à l'intérieur de chaque paramètre figure en annexe I-14. Le poids donné à chaque critère et l'attribution des points à l'intérieur de chacun d'eux restent subjectifs et, bien sûr, discutables. Pour cela les auteurs mentionnent que cette approche reste sujette à modifications notamment pour l'application à d'autres régions (Lafrechoux *et al*, 1983).

Cette approche permet d'obtenir 4 classes de sols : les très bons sols (classe A) placés entre 80 et 100 points, convenant à la plupart des cultures ; les bons à assez bons sols agricoles (classe B) avec de 60 à 79 points, où l'éventail des cultures peut être restreint par quelques facteurs limitants ; les sols agricoles médiocres (classe C) de 40 à 59 points, à potentialités réduites ; enfin les sols à faible ou très faible potentiel (classe D) avec moins de 40 points, lesquels doivent être réservés à la prairie ou au boisement. La valeur de la terre est déterminée pour son utilisation en systèmes de grandes cultures mais sans considérer une culture particulière.

Les résultats obtenus à partir de cette approche sont synthétisés dans le tableau 3.3 ; aucun sol n'atteint les 100 points.

Les sols de la classe A (80-100 points)

Trois sols du Barrois ont été placés dans la classe A, deux d'entre eux avec des qualités nettement meilleures : le FLUVIOSOL TYPIQUE (unité 1 : 85-90 points) et le NEOLUVISOL (unité 5 : 83-85 points). Le troisième sol est le CALCISOL (unité 4 : 78-82 points), lequel se trouve juste à la limite entre les classes A et B, mais son comportement face aux rendements agricoles, comme nous le verrons plus tard, le rattache plutôt à la classe A.

Le FLUVIOSOL montre un très bon potentiel mais les inondations saisonnières et aléatoires, reflétées moyennement par l'hydromorphie, rendent son expression difficile. Les NEOLUVISOLS ont aussi de bonnes aptitudes qui sont un peu pénalisées par le manque de carbonates, l'état calcique et organique moyen et la légère hydromorphie des horizons inférieurs. Dans le cas des CALCISOLS, la

Tableau 3.3 : évaluation de la valeur des sols en fonction de sept critères agropédologiques selon l'approche proposée pour la Région Centre de la France (Lafrechoux *et al*, 1983)

Unité pédo- logique	CRITERES							Total des points	Classes
	Texture	Teneur en carbonates	Prof. exp. par les racines	Pierrosité	Réserve utile en eau	Hydro- morphie	état calci- que et or- ganique		
1	20	5	15	10	10	10-15	15	85-90	A
2	20	5	5-7	2-5	2-4	20	15	69-76	B
3	15	5	5	10	6-7	5	9	55-56	C
4	20	0-3	10	10	6-7	20	12	78-82	B→A
5	25	0	15	10	8-10	18	7	83-85	A
6	15	0	10	10	6-7	20	3-6	64-68	B
7	25	0	10	10	6-8	10	6-9	67-72	B
8	15	0	10	10	7-8	5	3-6	50-57	C
9	5-10	0	5-8	10	2-5	20	3-6	45-59	C
10	5-10	0	10	10	6-7	20	3-6	54-63	B→C
val. max.	25	5	15	10	10	20	15	100	

profondeur moyenne, donc réserve utile en eau moyenne, et la texture argileuse, sont les légères contraintes observées. Les trois sont de très bons sols à hautes potentialités convenant à la majorité des cultures mais le climat et la topographie peuvent contribuer à interdire certaines productions (Lafrechoux *et al* 1983).

On ne trouve pas de sols de classe A dans le secteur des Vosges.

Les sols de la classe B (60-79 points)

Trois sols figurent dans cette classe : le RENDOSOL du secteur du Barrois (unité 2 : 69-76) et les BRUNISOLS MESOSATURES sableux et argileux du secteur des Vosges (unités 6 et 7 : ayant 64-68 et 67-72 points respectivement). L'unité 10 à cheval sur les classes B et C (54-63 points) sera décrite dans la classe C, car son comportement par rapport à la production agricole est plus proche de cette classe.

Les RENDOSOLS ont un potentiel limité par une contrainte forte (qui ne peut être levée, sauf avec irrigation ou dans le cas d'une pluviométrie importante en période estivale), la faible profondeur avec toutes ses conséquences : faible réserve utile en eau, pierrosité importante et travail du sol difficile. Comme la texture, l'état calcique et organique et l'hydromorphie, sont les facteurs les plus importants de cette classification, les RENDOSOLS sont donc un peu surclassés par rapport à leurs véritables potentialités.

Les BRUNISOLS MESOSATURES sableux ont plusieurs contraintes faibles : la texture sableuse, l'acidité (manque de carbonates et état calcique et organique bas), la profondeur exploitable par les racines et la réserve utile en eau ; ils sont avantagés par l'absence d'hydromorphie.

Les BRUNISOLS MESOSATURES argileux sont avantagés par la texture mais souffrent en contrepartie d'un mauvais ressuyage (hydromorphie) ; en plus ils sont pénalisés par l'acidité et la profondeur du sol.

Pour Lafrechoux *et al* (1983) le groupe des sols de classe B rassemble les sols d'aptitude agricole moyenne où existent une contrainte forte ou plusieurs contraintes faibles. Il est possible de lever certaines contraintes (hydromorphie, réserve en eau...) mais d'autres restent immuables (texture, profondeur du sol...) .

Les sols de classe C (40-59 points)

Cette classe est constituée par des sols agricoles médiocres possédant des potentialités réduites ; les facteurs défavorables ont une action prépondérante et exigeront des investissements coûteux pour leur amélioration (Lafrechoux *et al*, 1983). Nous trouvons 4 sols dans cette classe : le CALCOSOL du Barrois (unité 3 : 55-56 points), Le BRUNISOL MESOSATURE limoneux (unité 8 : 50-57 points) et les ALOCRISOLS TYPIQUES moyennement profonds et profonds (unités 9 et 10 : 45-59 et 54-63 points respectivement).

Les CALCOSOLS développés sur marnes grisâtres sont pénalisés à la fois par une texture défavorable, une faible profondeur de sol et une très mauvaise structuration des strates inférieures (litage horizontal de la marne et tassement), qui induit de sévères problèmes d'hydromorphie.

Les BRUNISOLS MESOSATURES limoneux d'Uzemain, souffrent davantage par la texture limoneuse (tendance à la battance), l'état calcique et organique faible (acidité) et l'hydromorphie importante dans les horizons inférieurs. Ils ont aussi des contraintes dues au manque de carbonates et à la profondeur du sol.

Les ALOCRISOLS TYPIQUES moyennement profonds sont pénalisés surtout par : la texture sableuse, la très faible réserve utile en eau, la profondeur exploitable par les racines et leur faible état calcique et organique. Ils sont avantagés seulement par l'aspect ressuyage et le manque de pierrosité.

Les ALOCRISOLS TYPIQUES profonds présentent les mêmes facteurs limitants que les sols précédents mais les contraintes liées à la réserve utile en eau et à la profondeur du sol sont moins prononcées.

Discussion

Le meilleur sol atteint à peine 90 points (FLUVIOSOL TYPIQUE), ce qui nous montre le manque de sols sans problèmes dans les deux secteurs étudiés.

Dans le secteur du Barrois, il faut mentionner que les unités cartographiques choisies correspondent majoritairement à des sols à bonne aptitude culturale (classe A), cependant nous distinguons une unité dans la classe B et une unité dans la classe C. A l'inverse dans le

secteur des Vosges les unités sélectionnées se trouvent dans la plupart des cas dans les sols médiocres (classe C), avec deux sols de classe B.

Les facteurs limitants qui ont pénalisés la plupart des sols sont : la réserve utile en eau et la profondeur exploitable par les racines, l'état calcique et organique de l'horizon arable, la texture et la teneur en carbonates ; par contre le facteur pierrosité ne concerne qu'un type de sol. Quant à la texture, la pondération des notes ne donne pas de renseignements quand il y a des horizons avec des textures contrastées dans le profil.

D'autres facteurs considérés comme importants vis-a-vis des potentialités régionales et qui ne sont pas pris en compte par cette classification sont : la topographie, l'état d'agrégation des différents horizons (tassement, battance, structure massive,...) et le climat.

Ceci nous permet de signaler la nécessité d'adapter cette méthode à la réalité lorraine, afin de mieux pondérer la notation des différents facteurs par rapport à leur influence sur les potentialités agricoles de la région.

3.4.3. L'EVALUATION GLOBALE DE LA POTENTIALITE AGRICOLE DES SOLS (MESURE DES RENDEMENTS PONCTUELS).

Les classements des sols utilisés précédemment risquent de ne pas être très parlants aux agriculteurs qui associent souvent potentialités et rendements.

Les méthodes d'évaluation globale ne font pas appel à l'analyse explicite des facteurs intervenant sur la valeur de la terre ; ces facteurs sont estimés globalement dans l'évaluation ; cette estimation peut être basée d'après Hallaire (1981), sur :

- la connaissance implicite de la "qualité" de la terre,
- la quantité ou la qualité des produits récoltés sur cette terre,
- la possibilité d'utilisation de cette terre.

Pour cette raison nous avons essayé une méthode d'appréciation globale de la potentialité agricole des sols basée sur la quantité de produits agricoles récoltés sur placettes (rendements ponctuels). On relie ainsi un ensemble de critères pédologiques (définis par la carte des sols) et un volume de production à l'hectare pour une année culturale donnée et pour des cultures spécifiques.

Nous avons donc évalué les rendements ponctuels sur les différents sols du secteur du Barrois pour les années culturales 1991/92, 1992/93 et 1993/94, grâce à la collaboration de la Chambre d'Agriculture de la Meuse. Pour le secteur des Vosges nous avons mesuré, avec la collaboration de la Chambre d'Agriculture des Vosges, seulement les rendements obtenus pour un BRUNISOL MESOSATURE et un ALOCRISOL TYPIQUE (unités 6 et 10), pour l'année culturale 1992/93. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.4. Les rendements mesurés correspondent à quatre types de production : maïs fourrage, orge de printemps et d'hiver et colza. Pour chaque culture les itinéraires techniques étaient similaires et non limitants.

Secteur du Barrois

- Campagne 1991-92

Le maïs a bénéficié de conditions relativement favorables pour la production agricole, la hiérarchie construite précédemment par les classifications de sols est assez bien respectée : les meilleurs rendements se retrouvent sur le NEOLUVISOL (18 t M.S. ha⁻¹), le FLUVIOSOL TYPIQUE et le CALCISOL, (16 t M.S. ha⁻¹) ; les moindres rendements sur RENDOSOL et sur CALCOSOL apparaissent aussi nettement (respectivement 12 et 7 t M.S. ha⁻¹).

Les résultats obtenus sur orge d'hiver sur CALCOSOL (73 qx ha⁻¹) et sur NEOLUVISOL (85 qx ha⁻¹) confirment aussi les différentes classes d'aptitude culturale attribuées par les deux classifications précédentes.

- Campagne 1992-93

Nous avons mesuré les rendements en maïs pour le FLUVIOSOL TYPIQUE et le RENDOSOL (respectivement 15 et 13 t M.S. ha⁻¹). Ces résultats confirment les écarts obtenus pendant la campagne précédente. Quatre des cinq sols suivis ont changé de culture lors de cette campagne en fonction d'une rotation maïs-orge de printemps.

Les résultats obtenus pour l'orge de printemps montrent les mêmes tendances que pour le maïs entre les unités 5, 4 et 2. L'unité 3 (CALCOSOL) laisse apparaître une sévère diminution des rendements (33 qx ha⁻¹) confirmant sa faible potentialité agricole. Pour l'orge d'hiver nous avons mesuré seulement les rendements sur le NEOLUVISOL, et ceux-ci sont équivalents à ceux obtenus la campagne précédente (plus un quintal ha⁻¹).

Tableau 3.4 : Rendements ponctuels (placettes) obtenus sur les différents sols étudiés

UNITE : SOL (CLASSES DE SOLS)*	1991/92		1992/93		1993/94			
	maïs fourrage t M.S. ha ⁻¹	orge hiver qx ha ⁻¹	maïs four- rage t M.S. ha ⁻¹	orge qx ha ⁻¹ prin- temps hiver		maïs four- rage t M.S. ha ⁻¹	orge hiver qx ha ⁻¹	colza qx ha ⁻¹
1) FLUVIOSOL TYPIQUE (II, A)	16		15					
2) RENDOSOL (III, B)	12		13	53		59	30	
3) CALCOSOL (VI, C)	7	73		33				30
4) CALCISOL (II, B→A)	16			61		16	66	
5) NEOLUVI- SOL (II, A)	18	85		64	86	17	70	
6) BRUNISOL MESOSA- TURE sableux (III, B)			19					
10 ALOCRISOL TYPIQUE profond (IV, B→C)			15					

*Classes d'aptitude culturale des sols : (système de huit classes, approche paramétrique).

- Campagne 1993-94

Les rendements en maïs fourrage montrent les mêmes tendances que lors des années précédentes pour les unités 4 et 5. Une tendance similaire pour les unités 2, 4 et 5 est confirmée pour les rendements en orge d'hiver. Par contre, les résultats en colza sont similaires pour les unités 2 et 3 dont les classes d'aptitude sont très différentes, montrant ainsi la variabilité des potentialités des sols par rapport aux types de cultures.

Secteur des Vosges

Pour le secteur des Vosges nous n'avons mesuré que les rendements en maïs dans les sols les plus représentatifs de chaque sous-secteur : le BRUNISOL MESOSATURE sableux profond d'Uzemain (unité 6) et l'ALOCRISOL TYPIQUE profond de Corcieux (unité 10), où les rendements sont respectivement de 19 et 15 t M.S. ha⁻¹. Ceux-ci refléteraient la moindre potentialité des ALOCRISOLS par rapport aux BRUNISOLS, liée sans doute aux textures plus sableuses et aux pH plus acides, mais aussi aux différences en altitude induisant des températures différentes.

Discussion

En résumé de ces trois campagnes notons que les différences sont beaucoup plus importantes sur culture de printemps (maïs) que sur céréale d'hiver. D'autre part notons que pour une culture d'hiver présentant des stades physiologiques pouvant se compenser (colza), la différenciation des aptitudes culturales des sols joue moins, surtout si l'implantation a eu lieu dans de bonnes conditions.

En ce qui concerne le maïs, les faibles rendements obtenus par le CALCOSOL s'expliquent, dans ces sols à mauvais drainage, par la difficulté d'implantation liée à l'efficacité du travail du sol au moment du semis.

De même les différentes cultures répondent différemment aux années climatiques, tout en conservant à l'intérieur de chaque année, la même hiérarchie entre les différents types de sols.

Ainsi il est impossible d'établir un jugement sur la potentialité des sols en fonction des rendements agricoles, en considérant les résultats d'une seule année climatique.

De plus, ces rendements traduisent une réalité ponctuelle qu'il est malaisé d'appliquer à la parcelle. En effet, lorsque les parcelles sont homogènes la mesure des rendements ponctuels donnera, pour une année climatique considérée, une bonne représentation de la potentialité parcellaire pour une culture spécifique ; mais, si la parcelle est hétérogène, ce qui est souvent le cas, l'utilisation d'une carte des sols détaillée pour adopter des itinéraires techniques adaptés, demeurera indispensable (Jacquin *et al*, 1993).

3.4.4. CONFRONTATION DES RESULTATS

Du fait des objectifs différents entre les classifications taxonomiques ("naturelles") et techniques, nous ne trouvons pas toujours de véritables liens entre les dénominations des sols et leurs potentialités culturales à l'échelle des secteurs de références (tableaux 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4). Ce lien est pourtant facilement constaté à de petites échelles (niveau mondial ou national) ; en effet, les sols définis par les classifications taxonomiques à des rangs supérieurs donnent une idée assez précise des potentialités des sols (Soil Survey Staff, 1975 ; Bartelli, 1978 ; Duchaufour, 1983 et 1991 ; FAO, 1991 ; Driessen et Dudal (eds), 1991).

Notons que les caractéristiques des sols utilisées par les classifications taxonomiques aux différentes catégories généralement ne sont pas nécessairement celles qui nous intéressent pour classer les sols par rapport à leur aptitude culturale à l'échelle des secteurs de références. Cependant l'utilisation du Référentiel Pédologique (A.F.E.S., 1992) permet, du fait du choix laissé aux classificateurs, d'employer les qualificatifs appropriés par rapport aux facteurs limitants de la production agricole ; néanmoins, si cette liberté représente un point positif pour des études visant à définir la potentialité agricole des sols, elle devient un handicap pour l'extrapolation des résultats à des sols similaires ; en effet bien que les références soient assez précises dans leur définition des horizons diagnostiques, les qualificatifs ajoutés dépendront de ce que le classificateur veut remarquer dans le sol au moment du classement.

* * * * *

Malgré la différence d'échelles à laquelle les deux systèmes de classement de l'aptitude culturale des sols (système américain de huit

classes et approche paramétrique Région Centre de la France) ont été développé, nous avons trouvé des relations assez étroites entre les classes de sols définis par ces deux méthodes (tableaux 3.2 et 3.3). Les différences entre les deux approches se présentent surtout au niveau de la classe ; exemple : le système américain donne la hiérarchie suivante dans la classe II en fonction du numéro des facteurs limitants : NEOLUVISOL>FLUVIOSOL>CALCISOL, tandis que pour l'approche paramétrique dans la classe A la hiérarchie est la suivante : FLUVIOSOL>NEOLUVISOL>CALCISOL. Ces différences de hiérarchisation intra-classe sont présentes aussi dans la classe III par rapport à la classe B et dans la classe IV par rapport à la classe C. Cette divergence dans l'interprétation est plus évidente dans le cas du CALCOSOL (unité 3), qui appartient à la classe VI dans la classification américaine, mais est considéré comme un des meilleurs sols de la classe C avec de 55 à 56 points par l'approche Région Centre. Ceci met en évidence la différence de poids donné à chaque facteur limitant dans chaque système.

Ainsi, on confirme que les systèmes de classification diffèrent davantage par le poids donné aux facteurs limitants, que par les facteurs limitants eux-mêmes (Marin-Laflèche, 1972 ; Bartelli, 1978 ; Hallaire, 1981 ; Sinaj, 1990).

En effet, nous avons observé que les facteurs limitants les plus utilisés pour les deux systèmes sont : la profondeur du sol (avec ses conséquences : profondeur d'enracinement et réserve utile en eau), la fertilité du sol (état calcique et organique, C.E.C.), la perméabilité (hydromorphie ou perméabilité excessive) et la texture du profil (soit comme facteur secondaire dans la classification américaine, soit comme facteur principal dans l'approche paramétrique). Ces facteurs ont été mentionnés aussi comme limitants de la production agricole en région Lorraine par Limaux (1988) et Florentin (1991), cependant ces auteurs soulignent le rôle principal de la roche-mère dans le comportement agricole des sols, ce qui fait défaut dans les deux systèmes utilisés.

Hallaire (1981) faisant une comparaison similaire à la notre entre le système de 7 classes anglais (INA-PG, 1974) et une évaluation paramétrique (Duclos, 1971), trouve des différences notables entre les deux approches. L'évaluation paramétrique est en général plus sévère car un sol possédant de nombreuses, mais légères contraintes, est autant de fois pénalisé, tandis que, dans l'approche anglaise

l'accumulation de contraintes mineures, n'entraîne pas un déclassement important du sol.

A la différence de notre travail, l'évaluation paramétrique utilisée par Duclos (1971), se contente de chiffrer l'influence des différents paramètres. Nous avons, en plus, regroupé, les types de sols en classes ; ainsi, les différences de hiérarchie établies à l'intérieur des classes pour les deux classifications, Hallaire (1981) les a observé pour l'ensemble des sols. Cependant, nous sommes en accord avec cet auteur par rapport à l'utilité limitée d'une note pour donner des renseignements, puisque deux sols pourront avoir une même note alors que leurs caractéristiques sont tout à fait différentes et qu'ils ne peuvent être utilisés de la même façon.

* * * * *

Quoi qu'il en soit on ne peut pas placer un sol sur une échelle de valeur (classe d'aptitude) sans considérer la productivité de ce sol pour un agrosystème donné (Sébillotte, 1989). En effet, des sols ayant été placés dans des classes inférieures de potentialités (unités 6 et 10 du secteur des Vosges placées respectivement dans les classes III et IV et B et C pour le système américain et l'approche paramétrique), présentent pour une même année culturale, des rendements du même ordre ou plus importants que les sols mieux classés du secteur du Barrois (unité 1 : respectivement classes II et A pour les deux systèmes mentionnés). Ceci met en évidence les défauts de précision par rapport aux indices climatiques régionaux de ces deux classifications.

La différence de réponse des plantes en fonction de l'étalement de leur cycle végétatif, aux divers types de sol est variable. Le colza, plante très plastique, est moins sensible aux variations climatiques que le maïs, comme le montre le tableau 3.4.

Les tendances des rendements ponctuels obtenus sur un même secteur pour une année climatique donnée se rattachent davantage aux classements des sols obtenus par les deux systèmes analytiques considérés ; cependant, ceci n'est pas si évident quand on essaie de comparer des secteurs de références entre eux.

En conclusion d'après nos résultats, nous avons trouvé que les rendements ponctuels (potentialités agricoles) obtenus par les différents sols sont en accord avec les classements d'aptitude culturale. Néanmoins les variations climatiques interannuelles affectent les rendements en valeur absolue, bien que les tendances se conservent. En outre ces potentialités agricoles varient entre les différents secteurs

en fonction des caractéristiques de la roche-mère et du climat. Enfin la potentialité agricole des différents sols varie en fonction des plantes cultivées et de leur cycle végétatif.

3.5. ETUDE DES POTENTIALITES DES SOLS LORRAINS.

Nous avons vu combien il était difficile d'apprécier les potentialités agronomiques des sols en se référant uniquement aux caractéristiques intrinsèques permanentes des sols. De même les critères pris en compte et les coefficients adoptés pour chacun d'eux, surtout dans le cas de l'évaluation paramétrique Région Centre, apparaissent, dans certains cas, mal adaptés aux sols lorrains. Nous avons donc besoin d'une démarche adaptée à la région, afin de déterminer les facteurs permanents des sols limitants pour la production agricole, en relation avec les niveaux de rendements des principales cultures et le climat.

* * * * *

En parallèle à notre travail une étude pluriannuelle a été mise en place par les Chambres d'Agriculture lorraines et le Service Science du Sol de l'ENSAIA. Sur une centaine de profils de sol il a été décrit les caractéristiques permanentes (pierrosité, texture, teinte...), réalisé des notations de profondeur et de densités d'enracinement et mesuré les niveaux de production et les composantes du rendement sous itinéraires techniques non limitants pour les cultures de blé, colza, orge et maïs (Florentin, 1991 ; Limaux *et al*, 1993) ; les travaux réalisés dans les secteurs de références s'intègrent dans cette démarche régionale.

Un des objectifs prioritaires de cette démarche a été de bâtir une typologie des sols permettant de rendre compte des variations de rendements potentiels pour les principales cultures. La mise en relation des critères sol et des composantes du rendement a fait apparaître l'importance d'un certain nombre de ces critères pour l'élaboration du rendement ; ainsi :

- Un même critère ne revêt ni la même signification ni la même importance selon que l'on a affaire à telle ou telle roche-mère ; il convient alors de raisonner par matériau géologique. Ainsi les contraintes des sols sur marnes ne sont pas de même nature que celles des sols sur grès ou calcaires.

- Pour une même roche-mère le comportement agronomique d'un sol est fonction de la texture et du développement du profil.

- Le volume de terre disponible pour les cultures est important dans tous les cas.

- La présence de carbonate de calcium dans la terre fine est un indicateur de bonne structuration et aération d'un sol et conditionne l'emploi de certains fertilisants.

- Le problème d'excès d'eau demeure le facteur limitant essentiel pour de nombreux sols lorrains.

L'étude concomitante de profils type et de sondage tarière a montré que nous pouvions accéder d'une façon acceptable à la plupart de ces critères à partir d'une démarche simple alliant les observations de surface et l'utilisation de la tarière (Florentin, 1991 ; Florentin et Limaux, 1992).

Une proposition de codification des sols et les conditions d'utilisation sont présentées en annexe I-15. Le sol est alors défini par quatre groupes de critères répartis en quatre cases ; ce sont :

- Case 1 : la nature du matériau atteint en fond de tarière.

- Case 2 : la profondeur de prospection possible à la tarière ; dans le cas des sols caillouteux, on estime l'importance de la couverture caillouteuse en surface à partir d'abaques.

- Case 3 : le développement du profil en fonction de la différenciation des horizons appréciés par leur texture ou la présence de couches différentes.

- Case 4 : la sensibilité à l'excès d'eau et les traces d'hydromorphie visibles.

Le tableau 3.5 établit une correspondance entre cette codification pour les dix sols étudiés dans ce travail. Les observations enregistrées à la faveur de ces deux secteurs de références et les résultats agronomiques mesurés ont pour but de contribuer à la construction de cette évaluation des potentialités. Pour une même codification ou pour des formulations voisines, les sols présentent donc des potentialités agronomiques semblables.

Les caractéristiques des sols employées pour élaborer cette codification, en plus de pouvoir être repérées aisément sur le terrain, doivent pouvoir être obtenues à partir d'études de sols à grande échelle. Notons qu'elles apparaissent dans le Référentiel Pédologique de l'A.F.E.S. (1992) ; soit au niveau des références, soit comme qualificatifs ; néanmoins une étude de corrélation entre les types de

Tableau 3.5 : Correspondance des unités cartographiques et codification synthétique lorraine

UNITE CARTOGRA- PHIQUE/ SOL	CODIFICATION SYNTHETIQUE			
	Matériau en fond de tarière	Profondeur de prospection de la tarière ou cailloux en surface	Développe- ment du profil	Hydromorphie
1 FLUVIOSOL TYPIQUE	SL(V)+	7	AL+/LAS ₇₀	D ₈₀
2 RENDOSOL	C	III	AL(C)+	S
3 CALCOSOL	M+	7	AL+/HC ₂₅	M→H ₂₅
4 CALCOSOL	C	3	AL/A ₂₅	S
5 NEOLUVISOL	C	6	La/A ₄₀	D
6 BRUNISOL MESOSATURE sableux	G	6	S	S
7 BRUNISOL MESOSATURE argileux	M+	7	La/AL ₄₀	M
8 BRUNISOL MESOSATURE limoneux	A	7	LSa/AL ₈₀	M
9 ALOCRISOL TYPIQUE moy. profond	G	3	S(C)	S
10 ALOCRISOL TYPIQUE profond	G	6	S	S

sols définis par le Référentiel et les facteurs limitants de la production agricole au niveau régional s'avère indispensable.

* * * * *

On sait cependant, que la production n'est pas indépendante des conditions climatiques de l'année. Il est alors intéressant de mettre en relation la production des sols ainsi codifiés, avec un ou plusieurs indices climatiques jugés pertinents pour une culture donnée (déficit hydrique pour les sols séchants, excès d'eau pour les sols hydromorphes...). Ainsi à partir d'une étude fréquentielle des ces indicateurs climatiques, on peut définir un potentiel de rendement accessible pour une prise de risque donné (Florentin et Limaux, 1992 ; Limaux *et al*, 1993).

Deux questions se posent : quel indice climatique prendre en compte et pour quelle période ? Pour répondre à ces questions il faut réfléchir en terme de type de culture, de type de sol et en fonction de la petite région naturelle considérée. Ainsi un indice climatique donné (le déficit climatique en mm d'eau par exemple), n'aurait pas la même signification pour des cultures d'hiver, de printemps ou d'été, dans des sols à bon ou mauvais drainage, ou bien, dans des régions sans périodes véritables de déficit climatique (Thierry, 1986).

La réponse à la deuxième question dépendra surtout de la courbe de croissance du végétal et de la définition des périodes sensibles aux indices climatiques choisis.

En Lorraine le déficit hydrique utilisé dans les premiers travaux (Limaux, 1985 et 1988 ; Florentin, 1991), a été remplacé par le déficit climatique en mm d'eau pour le blé et le maïs, compte tenu des problèmes pour déterminer la réserve en eau utile pour les différents sols. Cet indice est calculé par type de sol (donc à réserve en eau utile sensiblement identique), et pour la période la plus sensible pour les cultures ; par exemple : de l'épiaison à la maturité physiologique pour le blé (Massé, 1989). L'effet du déficit climatique sur les rendements en blé peut-être illustré par l'exemple d'un RENDOSOL de Colombey, lequel en 1988 a fourni 75,9 qx ha⁻¹ pour un déficit de 143 mm et seulement 48,7 qx ha⁻¹ en 1991 avec un déficit de 298 mm. (F. Limaux, communication personnelle)

Bien que ce travail soit en cours, la Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine et le Service Science du Sol de l'ENSAIA, viennent de publier une brochure : "Connaître les sols lorrains et leur potentiel de production" (CRAL-ENSAIA, 1993), dans laquelle cette

démarche est présentée avec les résultats obtenus pour 15 types de sol et pour certaines cultures (blé et maïs). Nous trouvons d'un côté les informations découlant de l'observation des profils ainsi qu'une photo ; et de l'autre : la codification tarière correspondante et les résultats agronomiques observés (voir exemple dans annexe I-16).

Dans le tableau 3.6 nous présentons les rendements en maïs fourrage mesurés sur 7 de nos unités de sols, en relation avec les déficits climatiques en mm d'eau pour cette culture. Le calcul de ce déficit est réalisé à partir des données des stations météorologiques les plus proches. Le déficit climatique est calculé en fonction de la somme des différences $ETP-P > 0$, pour la période encadrant la floraison femelle de $\pm 400^{\circ}C$ jours en base $6^{\circ}C$, conformément à la courbe de réponse du maïs au déficit hydrique réalisée par Robelin (Thierry, 1986).

Tableau 3.6 : Rendements en maïs fourrage et déficits climatiques en mm d'eau des sols des secteurs

Unité Sol	1991		1992		1993	
	Rendt. t M.S. ha-1	Def. clim. mm	Rendt. t M.S. ha-1	Def. clim. mm	Rendt. t M.S. ha-1	Def. clim. mm
1) FLU- VIOSOL	16	143	15	133		
2) REN- DOSOL	12	143	13	133		
3) CALCO- SOL	7	143				
4) CAL- CISOL	16	143			16	150
5) NEOLU- VISOL	18	143			17	150
6) BRU- NISOL			19	131		
7) ALO- CRISOL			15	négli- geable		

Observons que pour les sols du Barrois les écarts des déficits climatiques entre les trois années, ne sont pas très importants. Les rendements sont donc très comparables entre les trois années et les différences observées doivent être attribuées avant tout aux caractéristiques des sols.

Nous ne disposons pas de suffisamment de résultats agronomiques en fonction des années et des types de sol ; cependant, nous présentons à titre d'exemple le graphique construit par la CRAL à partir des résultats de six années pour les sols sableux (fig 3.2).

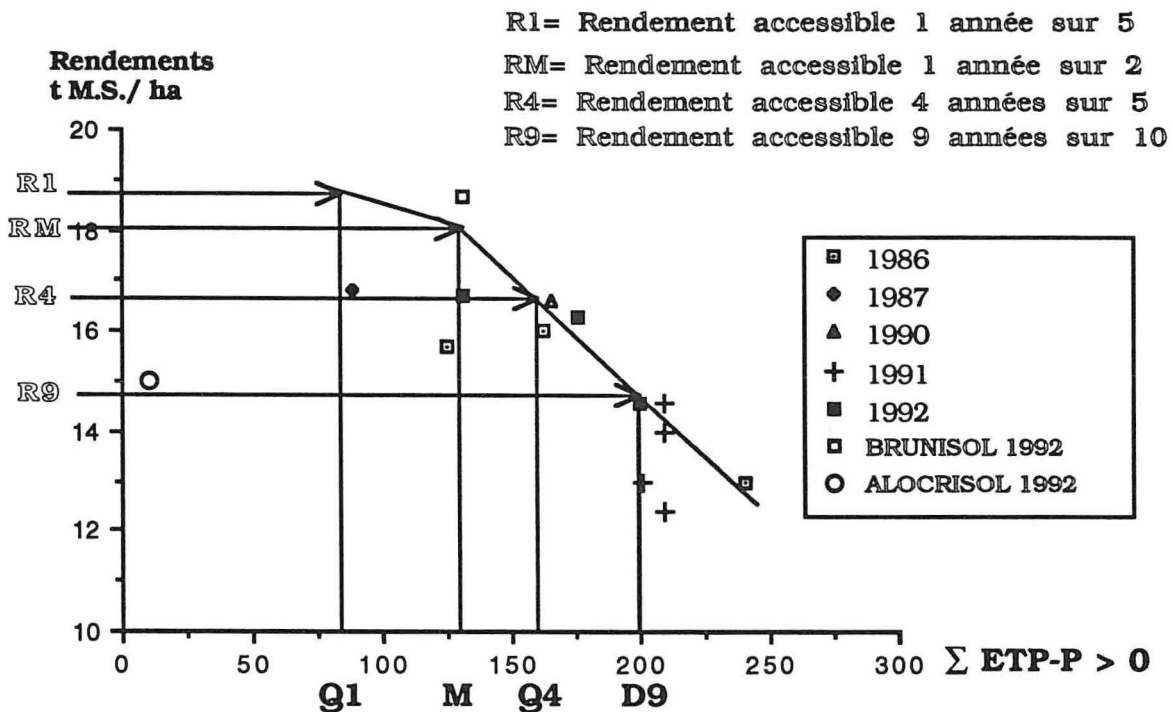


fig 3.2 : Rendements en maïs fourrage sur sols sableux

Sur ce graphique nous avons placé les résultats obtenus dans les Vosges pour les deux sols sableux pendant l'année 1992. Nous avons mesuré pour le BRUNISOL MESOSATURE et l'ALOCRISOL TYPIQUE des rendements en maïs fourrage de 19 et 15 t M.S. ha⁻¹ pour des déficits climatiques respectivement de 131 et 0 mm (tableau 3.6). On note que le point du BRUNISOL se situe sur la médiane (M) du déficit climatique et participe à la construction de la courbe enveloppe pour ce type de sol. l'ALOCRISOL ne présente pas de véritable déficit mais son rendement se situe bien en-dessous du rendement potentiel, ceci indique qu'il y a un autre facteur limitant que nous n'avons pas

considéré. Pour ce sol du secteur de Corcieux le choix du déficit hydrique comme indice climatique, ne parait donc pas être très judicieux ; les températures peuvent être davantage explicatives des rendements en maïs et de ses variations dans ce sous-secteur.

Pour les autres secteurs il faut remarquer que le choix du déficit climatique en mm d'eau comme indice climatique convient parfaitement pour des sols sains et sensibles aux variations de la réserve utile en eau (sols superficiels et sols sableux par exemple). Pour les sols hydromorphes et pour des années ou des climats très humides, il convient très certainement de faire intervenir en plus ou à la place du déficit climatique d'autres indices climatiques (somme des excès d'eau par exemple) ; de même pour des climats humides et froids (Corcieux par exemple), un indice climatique basé sur la somme des températures est envisageable. Les sols profonds de texture équilibrée ou argileuse avec une réserve en eau utile importante, supportent des déficits climatiques de l'ordre de 300 mm sans qu'il n'y ait de baisse de rendement en blé (Comité Action Potentialités, 1993).

Pour clarifier la prise de risque que doit prendre l'agriculteur donnons un exemple : Sur la fig 1 un déficit climatique inférieur à 85 mm se produit 1 année sur 5 (Q1= premier quintile). Le rendement correspondant à ce déficit est d'environ 19 t M.S. ha⁻¹. Par conséquent, si l'agriculteur se fixe un objectif de rendement supérieur ou égal à celui-ci et assure une fertilisation azotée correspondante, 4 années sur 5 il ne pourra atteindre ce rendement. Concrètement ce choix se traduira par une dépense inutile et des risques de pollution pour le milieu.

* * * * *

Un autre problème se pose : quel objectif de rendement viser pour des parcelles ayant deux ou plusieurs types de sol (ce qui est souvent le cas)? Pour montrer l'importance de l'hétérogénéité parcellaire sur la potentialité agricole, nous présentons les résultats de rendements acquis pour trois années sur une parcelle du Portlandien dans le secteur du Barrois, ayant trois types de sol (fig 3.3 ; voir photos page 84 bis).

Cet exemple montre bien les variations de rendements qui peuvent être atteints par les différents types de sol sur une parcelle. Pour répondre à la question, la typologie des sols et les rendements potentiels correspondants, devront permettre de proposer à l'agriculteur des plans de potentialités parcellaires. Pour ce faire, à



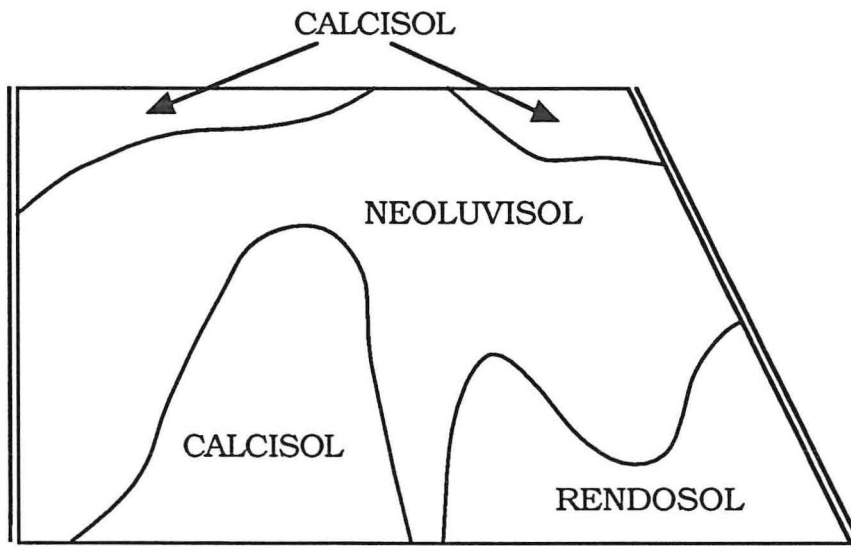
Prise de vue aérienne



Prise de vue terrestre

EXEMPLE D'HETEROGENEITE PARCELLAIRE SUR LE PLATEAU
CALCAIRE DU PORTLANDIEN

partir d'une reconnaissance pédologique à la tarière, un zonage de la parcelle devra être réalisé. A chaque zone sera attaché un niveau de potentialité ; ainsi l'agriculteur pourra décider en connaissance de cause du choix de l'objectif de rendement. Parallèlement, la prévision des fournitures d'azote du sol à partir de grilles de prévision (CRAL, 1991), permettront le calcul et la mise en oeuvre de doses d'azote mieux ajustées (Jacquin *et al*, 1993) (fig 3.4).



ANNEE/ CULTURE	RENDEMENT/SOL		
	NEOLUVISOL	CALCISOL	RENDOSOL
1991/MAIS T MS/HA	18	16	12
1992/ORGE PRINTEMPS QX/HA	64	61	53
1993/ORGE HIVER QX/HA	70	66	59

fig 3.3 : Variation des rendements dans une parcelle du secteur du Barrois avec trois types de sols

* * * * *

Des graphiques comme la figure 3.2 doivent être mis au point pour les différents types de sols et cultures en Lorraine. Déjà la présentation de 15 fiches dans la brochure faite par la CRAL-ENSAIA est un point de départ, mais il faudrait compléter les résultats. Pour cela, il faudrait valoriser les études agro-pédologiques déjà existantes. Le rattachement de la typologie des sols aux unités pédologiques décrites dans ces études permettra cette valorisation. Par ailleurs l'intégration de l'acidité des sols comme paramètre de la typologie des sols doit être envisageable.

Enfin, Il faudrait compléter la typologie des sols en augmentant les repères agronomiques pour d'autres types de sols et d'autres cultures, ceci pendant plusieurs années climatiques. Dans ce but la CRAL à mis en route au printemps 1992 le réseau O.P.A.L. (Observatoire des Potentialités Agro-climatiques en Lorraine), lequel va permettre de généraliser ce type de références grâce à des parcelles représentatives, par la répartition de leurs sols, des principales régions naturelles lorraines.

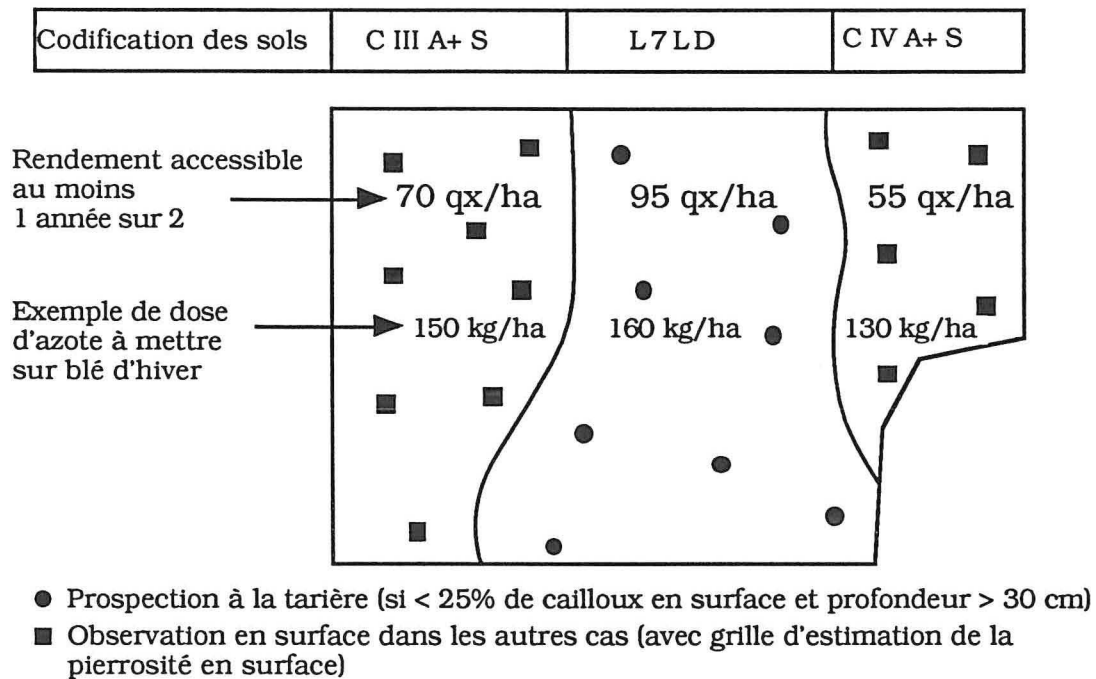


fig 3.4 : Exemple de plan de potentialité parcellaire
(source : CRAL-ENSAIA, 1993)

3.6. CONCLUSIONS

A partir des études agropédologiques réalisées sur deux secteurs de références en région Lorraine, nous avons entrepris une démarche visant à mettre en relation l'aptitude culturale actuelle des sols (potentialité culturale des sols considérant ses facteurs limitants actuels), avec les rendements agronomiques sous itinéraires techniques non limitants obtenus pendant trois campagnes agricoles, afin de définir les potentialités agricoles des sols en fonction de la variabilité géographique et interannuelle du climat.

* * * * *

Dans un premier temps nous avons constaté que si les classifications taxonomiques des sols donnent un bon aperçu des potentialités des sols à des échelles inférieures à 1/250000^e (Duchaufour, 1991), elles s'avèrent insuffisantes pour donner des renseignements conduisant à une classification des aptitudes culturales des sols à l'échelle du secteur de référence : 1/10000 à 1/25000^e ; cependant l'utilisation du Référentiel Pédologique (A.F.E.S., 1992) montre une certaine adéquation pour répondre à ce problème du fait de l'utilisation de qualificatifs mais ceci présente un risque de subjectivité dans la désignation des sols.

* * * * *

En ce qui concerne l'objectif principal nous constatons que malgré une différence d'échelle pour lesquelles ont été développés les deux systèmes de classement de l'aptitude culturale des sols employés (système américain de huit classes : Klingebiel et Montgomery, 1961 ; I.M.T.A., 1988 ; et l'approche paramétrique Région Centre de la France : Lafrechoux *et al*, 1983), nous avons trouvé des relations assez étroites entre les classes de sols définies par les deux méthodes. Les différences de tendances de potentialités entre les deux approches se présentent surtout au niveau de la classe ; ceci a permis de confirmer que ces systèmes de classification diffèrent davantage par le poids donné aux facteurs limitants, que par les facteurs limitants eux-mêmes. Les facteurs limitants les plus utilisés comme facteurs de classification sont : la profondeur du sol (avec ses conséquences : profondeur d'enracinement et réserve utile en eau), la fertilité du sol (état calcique et organique, C.E.C.), la perméabilité (hydromorphie ou perméabilité

excessive) et la texture du profil (soit comme facteur secondaire dans la classification américaine, soit comme facteur principal dans l'approche paramétrique).

Ces constatations permettent d'envisager l'utilisation d'approches mixtes d'évaluation de la potentialité des sols pour mettre en évidence les facteurs du milieu qui ont une influence sur la productivité agricole du sol. Ceci permettra également de valoriser les études antérieures de sols, qui ont représenté une dépense considérable en ressources financières et humaines.

* * * * *

Comparant les classements par rapport aux rendements ponctuels nous trouvons que les tendances des rendements ponctuels d'un même secteur, pour une année climatique donnée se rattachent aux classements de potentialités des sols, mais ce fait, n'est pas aussi évident quand on compare deux années climatiques différentes, ou des cultures à cycle végétatif plus ou moins long, ou des secteurs de références comportant des roches-mères différentes. Il existe donc des problèmes de classification liés au manque de précision des indices climatiques régionaux et à la non prise en compte de paramètres liés à l'effet de la roche-mère sur la potentialité du sol, dans les deux systèmes de classification d'aptitude testés.

Nos résultats et ceux obtenus par d'autres chercheurs travaillant en Lorraine (CRAL-ENSAIA, 1993), confirment la nécessité de bâtir une typologie des sols à partir des études cartographiques déjà faites, typologie qui permet de rendre compte des variations de rendements potentiels pour les principales cultures. L'importance de certains facteurs du milieu dans l'élaboration des rendements est ainsi mise en évidence : la roche-mère, la texture et le développement du profil, le volume de terre disponible pour les cultures, la présence de carbonate de calcium comme indice de bonne structuration et aération d'un sol, les problèmes d'excès d'eau. Il est alors possible de proposer une codification, plutôt qu'une classification, des différents sols et celle-ci sera mise en relation avec les paramètres climatiques jugés importants pour les cultures d'intérêt régional. A partir d'une étude fréquentielle du paramètre climatique on pourra donc définir un potentiel de rendement accessible pour une prise de risque donnée en fonction d'itinéraires techniques non limitants (CRAL-ENSAIA, 1993). Ce travail est en marche et les résultats déjà acquis permettent d'envisager la réalisation d'une typologie des sols pouvant être capable de définir les

rendements potentiels et d'adapter des itinéraires techniques respectant l'environnement. Des améliorations à cette démarche sont envisageables afin de compléter cette typologie qui doit rester le plus simple possible.

En outre, les rendements ponctuels traduisent une réalité qu'il est malaisé d'appliquer au niveau parcellaire, en effet, si la parcelle est hétérogène ce qui est souvent le cas, l'utilisation de la carte des sols détaillée pour envisager une redistribution parcellaire ou pour préciser une conduite culturale adaptée, reste indispensable (Jacquin *et al*, 1993).

* * * * *

L'utilisation de ces démarches pour la mise en oeuvre d'un dispositif similaire dans la région tropicale du Mexique est possible : dans cette région des travaux d'homogénéisation des séries de sols répertoriés dans les différentes études de sols à grande et moyenne échelle ont déjà été réalisés (Palma-López, 1985a). Une carte régionale des sols au niveau des grands groupes du système américain "Soil Taxonomy" a aussi été élaborée (Palma-López *et al*, 1985). L'utilisation de cette démarche permettra de valoriser ces travaux et les études de sols en général vis-à-vis du développement agricole régional. Des travaux sont en cours de réalisation dans le domaine des zonages climatiques, afin de transposer les cartes de sols et des zones agro-climatiques, pour définir des unités pédo-climatiques (petites régions naturelles). Sur ces unités nous essayerons de définir une codification des sols la plus simple possible, en partant des caractérisations des sols et en prenant en compte les facteurs limitants répertoriés par les études de sols ; cette réalisation pourra être effectuée en utilisant les classifications de potentialités des sols, surtout le système de huit classes, le plus répandu au Mexique. Ainsi nous envisageons de relier des paramètres observables à la tarière avec les principaux facteurs limitants de nos sols tropicaux. Cette liaison sera facile pour des caractéristiques observables telles que l'hydromorphie, la salinité, l'érosion, les propriétés verticales, la topographie ; pour les caractéristiques bio-chimiques, il faudra réaliser des investigations en s'appuyant surtout sur des caractérisations au niveau des séries de sols ; les travaux réalisés par Sanchez *et al* (1982) dans la région tropicale de l'Amérique du Sud, sur la classification de la fertilité des sols peuvent indiquer le chemin à suivre.

Quant aux paramètres climatiques il devront être liés aux excédents et aux déficits saisonniers en eau, la température n'étant pas limitante ; les résultats des agro-météorologistes nous faciliterons la tâche.

Le choix des cultures devra être envisagé par étape, du fait de la grande variabilité rencontrée au niveau des cultures annuelles, semi-pérennes et pérennes dans ce milieu tropical.

* * * * *

Dans le cadre de ce mémoire, une fois définie une méthodologie permettant d'établir l'objectif de rendement à viser grâce à l'analyse des potentialités des sols, nous nous sommes intéressés à trouver des liens entre un outil du développement agricole (le conseil de fertilisation), et la potentialité des sols. Notre choix a porté sur la fertilisation azotée raisonnée du maïs. Il est de première importance, alors, d'analyser les mécanismes liés au devenir des fertilisants azotés dans les différents types de sols, pour bien comprendre leur comportement et pouvoir proposer des références pour une production de maïs, en accord avec la potentialité des sols et ceci sans nuire à la qualité de l'environnement. Or ce choix nous entraîne à étudier le devenir des fertilisants azotés à la fois vis-à-vis de la production (prélèvement de la plante), mais aussi face au cycle interne des compartiments azotés dans différents types de sols présentant des potentialités culturales diverses.

TROISIÈME PARTIE :
DEVENIR DES FERTILISANTS AZOTÉS
DANS DIFFÉRENTS SOLS CULTIVÉS EN
MAÏS

CHAPITRE IV : ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA TENEUR EN NITRATES DANS DIFFERENTS SOLS DES SECTEURS DU BARROIS ET DES VOSGES

4.1. : INTRODUCTION

Nous avons vu dans le chapitre III que la détermination des potentialités agronomiques des sols était très importante puisqu'elle permettait sur le plan technique et économique, d'adopter des itinéraires techniques adaptés aux caractéristiques et aux potentialités des sols. Elle est aussi un moyen de moduler les quantités d'intrants à utiliser et notamment la fertilisation azotée. Dans cet esprit nous avons suivi la teneur en azote minéral dans un certain nombre de sols répertoriés dans les secteurs d'études. Nous partons du principe que toute expérimentation devrait être effectuée par rapport à une classification des sols basée sur des critères objectifs et appropriés. En effet, d'après Carlotti (1992) ce premier travail est à entreprendre afin d'élaborer des références correctes, en particulier dans le domaine de la fertilisation azotée.

L'augmentation de l'utilisation des fumures azotées, spécialement sous forme organique, crée des problèmes pour l'environnement liés au transfert de l'excès d'azote vers les eaux souterraines et superficielles (Reiniger *et al*, 1991). Sébillotte et Meynard, (1990) mentionnent que la diversité des "fuites" nitriques dans un champ cultivé est le fruit de quatre histoires : le devenir de l'eau, les variations des quantités d'azote minéral présentes dans le sol, les stades de développement et les vitesses de croissance des peuplements végétaux, et enfin, l'accroissement de la profondeur de l'enracinement. Les facteurs influençant ces "quatre histoires" dépendent du milieu naturel (climat, sol) et du système de culture. Les mêmes auteurs mentionnent que l'évaluation des milieux en fonction des risques de lixiviation de l'azote dépend du bilan hydrique en période excédentaire, de la profondeur de sol exploitable par les racines et de la variabilité interannuelle des potentialités agricoles.

Nous avons donc essayé de relier le classement d'aptitude culturale de quelques sols étudiés dans le chapitre antérieur, avec le suivi des nitrates présents dans ces sols pour un système de culture

considéré à risques pour l'environnement : le maïs fourrage (Carlotti, 1992 ; Falisse, 1992 ; Desvignes, 1993).

4.2. MATERIELS ET METHODES

4.2.1. LES SITES D'ETUDES.

Nous avons suivi la cinétique des nitrates présents au cours d'une année culturale dans six sols du secteur du Barrois et un sol du secteur des Vosges (tableau 4.1). Tous ces sols ont déjà été décrits dans le chapitre antérieur (chapitre III), leurs caractéristiques physico-chimiques apparaissent dans les annexes II-1 à 11-6 sauf le RENDOSOL argilo-limoneux, hypo-calcaire ; en fait ce sol ne se différencie de l'autre RENDOSOL que par les teneurs en CaCO_3 plus faibles en surface (< 15% de CaCO_3 total) :

Tableau 4.1 : secteurs de références, parcelles et sols étudiés

Secteurs de références	Parcelles	Sols (A.F.E.S., 1992)
secteur du Barrois	Portlandien	RENDOSOL argilo-limoneux, hypo-calcaire
		CALCISOL argileux
		NEOLUVISOL limono-argileux
	Kimméridgien	RENDOSOL argilo-limoneux
		CALCOSOL argilo-limoneux
	vallée de l'Aire	FLUVIOSOL TYPIQUE argilo-limoneux
secteur des Vosges	Uzemain	BRUNISOL MESOSATURE sablo-argileux

Le suivi a été réalisé durant les campagnes culturales 1991-92 dans le Barrois et 1992-93 dans les Vosges.

Dans le cas du secteur du Barrois le choix des parcelles prospectées a été orienté vers des parcelles présentant deux ou trois

types de sols ; ainsi nous avons choisi une parcelle sur le sous-secteur du Portlandien sur laquelle existait trois types de sols : le NEOLUVISOL, le CALCISOL et le RENDOSOL hypo-calcaire. Sur le sous-secteur du Kimméridgien nous avons choisi une parcelle avec deux types de sols : un CALCOSOL et un RENDOSOL. Enfin, nous avons choisi une parcelle dans la vallée de l'Aire avec un FLUVIOSOL TYPIQUE. Sur toutes les parcelles le précédent cultural était le maïs fourrage. Les itinéraires techniques étaient similaires, à l'exception de la dose d'azote déterminée par l'agriculteur à partir des grilles élaborées par la Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine et basées sur la méthode du bilan simplifiée (CRAL, 1991). Les doses ont été respectivement de 125, 110 et 150 kg N ha⁻¹ pour les parcelles du Portlandien, du Kimméridgien et de la vallée de l'Aire ; l'apport a été réalisé en une fois au moment du semis (entre le 14 et 22/04/91).

Dans le cas du secteur des Vosges le choix a porté sur une parcelle avec précédent maïs et ayant un itinéraire technique le plus proche possible de celui des sites du Barrois. La fertilisation azotée a été constituée par deux doses : 60 et 90 kg N ha⁻¹. La première dose a été apportée au semis (le 08/04/92). La deuxième dose a été apportée en deux fois : 60 kg N ha⁻¹ au semis et 30 kg N ha⁻¹ au stade huit feuilles. Un témoin sans azote a aussi été suivi.

Les conditions climatiques pour les campagnes culturales mentionnées dans les deux secteurs, apparaissent dans la planche 4.1.

4.2.2. METHODOLOGIE

Nous avons choisi comme variable la mesure de l'azote sous forme nitrique, car la forme ammoniacale est essentiellement transitoire dans les sols agricoles notamment sous climat tempéré (Vinten et Smith, 1993).

Cette étude a été faite sur deux horizons pour les six sols du Barrois : 0-25 et 25-50 cm, à l'exception des sols superficiels dans lesquels on n'a étudié que la couche arable (RENDOSOLS). Pour le sol des Vosges trois horizons ont été prospectés : 0-20, 20-40 et 40-70 cm. L'échantillonnage a été effectué par carottage à la tarière. Pour chaque type de sol et pour chaque horizon il a été prélevé un échantillon moyen à partir de 5 carottages.

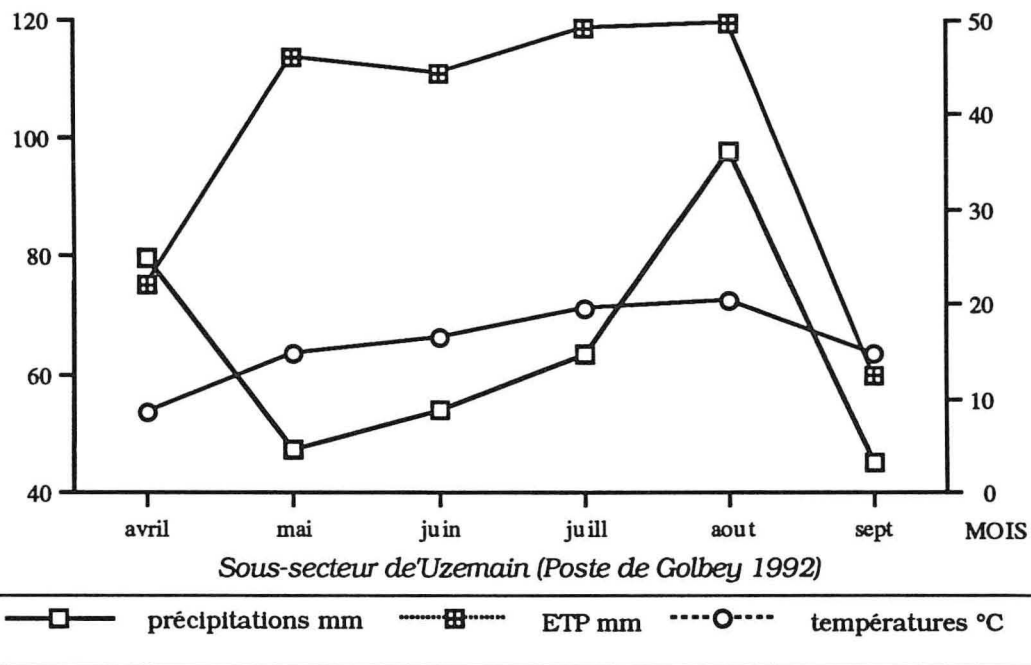
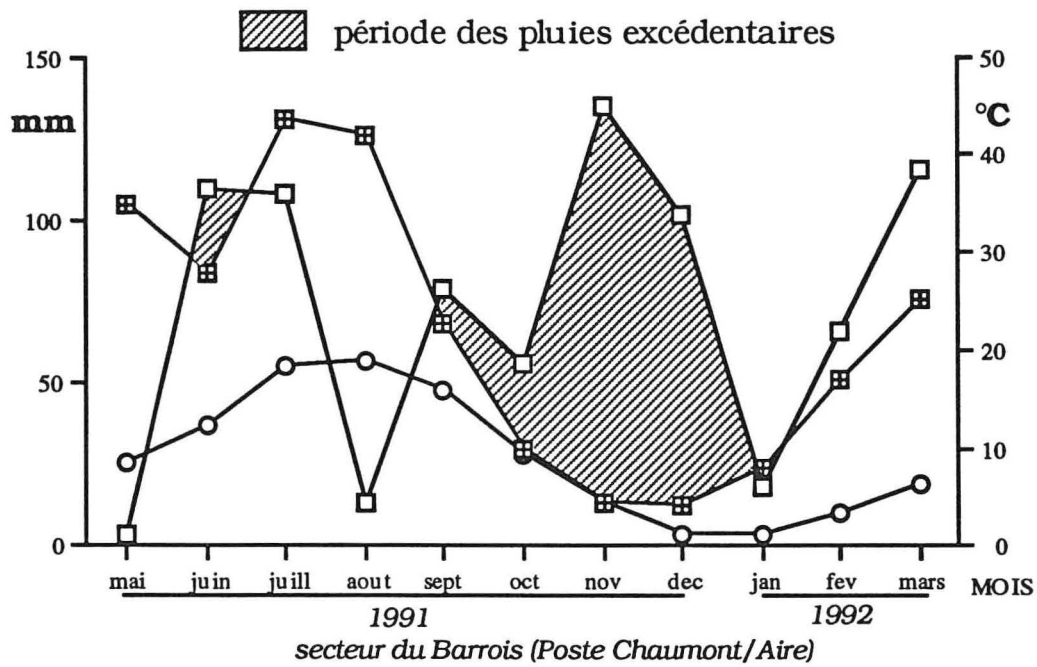


Planche 4.1 : données climatologiques des secteurs du Barrois et des Vosges (Uzemain) pendant la période de suivi des nitrates

Les prélèvements ont été réalisés à sept dates différentes pour les sols du Barrois (pendant et après la croissance du maïs) et six dates pendant la croissance du maïs pour le sol des Vosges.

Le sol a été ensuite stocké au réfrigérateur (3°C) et extrait le plus vite possible par KCl 1N. L'extrait a été dosé par colorimétrie automatique (autoanalyseur technicon), les résultats (en mg l⁻¹ de N-

NO₃) ont été transformés en kg N-NO₃ ha⁻¹ en prenant en compte la densité apparente des horizons, la charge en cailloux pour les sols superficiels et l'humidité du sol au moment du prélèvement (Lafleuriel, 1990). Cette méthode ne donne pas la concentration ou le flux des nitrates lixiviés mais elle mesure les quantités de nitrates dans le sol risquant d'être lixiviés (Addiscott, 1990).

Par ailleurs nous avons dosé l'azote total (en %) des sols du Barrois sur les différents prélèvements par dosage élémentaire (CHN Carlo Erba), nous avons transformé les valeurs relatives en valeurs absolues (kg N ha⁻¹) en considérant comme pour les nitrates le poids de terre fine.

4.3. RESULTATS ET DISCUSSION

4.3.1. TENEUR EN AZOTE TOTAL

Le tableau 4.2 montre les résultats moyens des teneurs en azote total (Nt) de la couche arable (exprimées en % et en kg ha⁻¹), pour les six sols du Barrois (moyennes obtenues à partir des sept dates de prélèvements). Tous sols confondus la comparaison des classes d'aptitude culturale des sols avec les teneurs en Nt (%) ne donne pas de correspondance directe. Rappelons que les classements des sols sont issus des deux systèmes analytiques utilisés dans le chapitre antérieur : la classification américaine de huit classes (Klingebiel et Montgomery, 1961 ; IMTA, 1988) et l'approche paramétrique Région Centre de la France (Lafrechoux *et al*, 1983). Néanmoins, en fonction du degré de carbonatation nous observons une certaine correspondance. En effet, pour les sols carbonatés nous constatons des teneurs en Nt (%) plus élevées que pour les sols décarbonatés (CALCISOL et NEOLUVISOL), avec une exception toutefois pour le CALCOSOL lequel montre des teneurs en Nt (%) faibles ; rappelons cependant que ce sol est classé à aptitude culturale médiocre, et que d'autres facteurs limitants que l'azote peuvent intervenir davantage.

Comparant les valeurs calculées de Nt en kg ha⁻¹, nous constatons que les sols les mieux classés quant à leur niveau de potentialité montrent des teneurs plus élevées en Nt (FLUVIOSOL,

NEOLUVISOL et CALCISOL), tandis que les sols de classe intermédiaire présentent des quantités inférieures en Nt (RENDOSOLS), sans doute en liaison avec le faible poids de terre fine disponible du fait de la charge en cailloux importante de l'horizon arable (55% en moyenne). Le cas du CALCOSOL doit être à nouveau discuté à part ; en effet ce sol à aptitude culturale médiocre possède cependant des teneurs élevées en Nt (kg ha^{-1}) ; ceci serait consécutif à la grande compacité de ce sol (densités apparentes élevées) qui donne un poids de terre fine très important mais provoquerait également un net ralentissement de l'activité biologique (Morel, 1989).

Tableau 4.2 : comparaison de certaines caractéristiques de l'horizon arable et des classes d'aptitude des sols du secteur du Barrois

Parcelles	Sols	Classes de sols*		CaCO ₃ actif %	N total	
		Syst. 8 classes	Appr. param.		%	kg ha ⁻¹
Portlan- dien	RENDOSOL hypo-calcaire	III	B	2	0,20	1908
	CALCISOL	II	B⇒A	0	0,13	3935
	NEOLUVISOL	II	A	0	0,11	3740
Kimmé- ridgien	RENDOSOL	III	B	13	0,25	2750
	CALCOSOL	VI	C	14	0,12	4740
Vallée de l'Aire	FLUVIOSOL	II	A	13	0,45	8100

* Systèmes de classification des sols : Système américain de 8 classes (Klingelbiel et Montgomery, 1961 ; IMTA, 1988) ; approche paramétrique de la Région Centre de la France (Lafrechoux *et al*, 1983)

4.3.2. EVOLUTION DE LA TENEUR EN NITRATES.

Examinons maintenant l'évolution des nitrates dans les six sols du Barrois. La fig 4.1 montre la cinétique du N-NO₃ mesurée sur 50 cm de profondeur à l'exception des deux RENDOSOLS où la mesure a porté sur 25 cm.

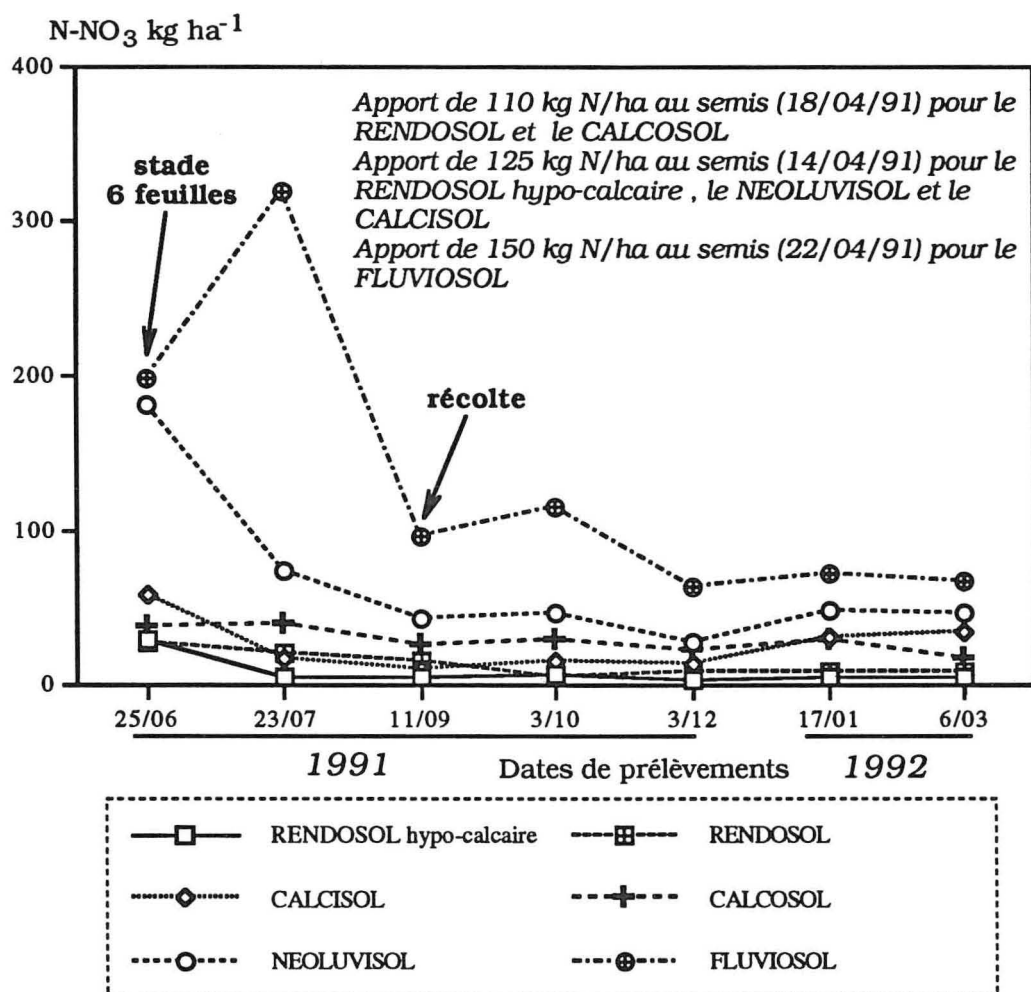


fig 4.1 : suivi des nitrates sous culture de maïs dans les six sols du secteur du Barrois

Le FLUVIOSOL présente tout au long de la campagne de prélèvements les teneurs les plus élevées en nitrates avec une forte augmentation lors du deuxième prélèvement (environ 120 kg N ha⁻¹ de plus que lors du premier) ; les intenses pluies de fin juin et début juillet (planche 4.1), ainsi que la position physiographique de ces sols de

vallée peuvent expliquer cette augmentation ; à la récolte les teneurs descendent à environ 96 kg N ha⁻¹ pour s'accroître au mois d'octobre à environ 115 kg N et se maintenir ensuite à des valeurs proches de 65 kg N ha⁻¹. Il nous faut mentionner également que cette vallée comportait encore tout récemment des vieilles prairies permanentes et qu'un "flush" saisonnier de minéralisation de ces réserves organiques azotées n'est pas exclu.

Les teneurs du NEOLUVISOL se maintiennent à un niveau très élevé lors du prélèvement de juin, soit environ deux mois après l'apport du fertilisant. Ce constat peut être expliqué par plusieurs hypothèses :

- après l'apport d'engrais nous avons eu, du point de vue climatique, une période de sécheresse d'environ un mois, pendant laquelle l'organisation de l'engrais a pu avoir eu lieu (Chéloufi, 1991 ; Sulce, 1993), ensuite, en juin, les précipitations orageuses ont permis une reminéralisation rapide et intense de la biomasse microbienne.

- d'autre part du fait d'une position topographique en légère dépression où se sont maintenus les dépôts éoliens de limons, ce sol a pu recevoir des eaux de ruissellement chargées en nitrates.

Ensuite les teneurs présentent une nette décroissance et se stabilisent aux environs de 50 kg N ha⁻¹.

Rappelons que le FLUVIOSOL et le NEOLUVISOL correspondent aux sols les mieux classés par rapport aux potentialités naturelles.

* * * * *

Les quatre autres sols ont un comportement plus homogène. Remarquons cependant que le CALCISOL présente une diminution importante dès le deuxième prélèvement (stade floraison femelle), pour s'abaisser à des valeurs inférieures à 20 kg N ha⁻¹ avec une remontée atteignant la valeur de 35 kg N ha⁻¹ début mars, époque de la reprise végétative.

Les trois autres sols présentent tous de très faibles valeurs en nitrates, tout au long de la période d'observation ; ceci peut s'expliquer comme nous le verrons ultérieurement par des périodes de lixiviation, mais aussi par une organisation de l'engrais sous formes plus stables, vraisemblablement du fait de la présence de carbonate de calcium (Chéloufi, 1991), se traduisant par des valeurs toujours inférieures à 20 kg N ha⁻¹ à la reprise de la végétation.

Nous constatons une bonne hiérarchie quant aux fournitures des sols par rapport aux classes d'aptitude, à cette période de reprise de la végétation, facteur essentiel de la productivité pour les cultures d'hiver.

4.3.3. BILAN DE L'AZOTE (tableau 4.3)

Quand on considère les exportations par la culture du maïs sur les trois sols de la parcelle du Portlandien, nous trouvons des valeurs respectives de 234, 208 et 182 Kg N ha⁻¹ pour le NEOLUVISOL, le CALCISOL et le RENDOSOL hypo-calcaire ; nous notons une meilleure utilisation de l'azote, donc une meilleure potentialité, du NEOLUVISOL, suivi par le CALCISOL et enfin le RENDOSOL. Les reliquats nitriques montrent la même hiérarchie.

Si nous comparons l'azote prélevé par le maïs et les reliquats des deux sols du Kimméridgien à la récolte, nous notons qu'il existe un moindre prélèvement d'azote dans le CALCOSOL et des reliquats plus importants. Ceci pourrait s'expliquer par l'organisation de l'azote engrais dans la fraction organique du sol avec reminéralisation tardive (Chéloufi, 1991). L'exportation de N par le maïs dans ces deux sols est d'environ 156 et 91 kg N ha⁻¹ respectivement pour le RENDOSOL et le CALCOSOL (tableau 4.3). Notons que l'on observe approximativement une valeur double des reliquats dans le CALCOSOL par rapport au RENDOSOL ; toutefois la profondeur d'échantillonnage n'était que de 25 cm dans le RENDOSOL.

Le FLUVIOSOL montre un prélèvement de 208 kg N ha⁻¹ lié à de bons rendements, mais les reliquats après récolte sont très importants ; le devenir de ces nitrates sera discuté dans la partie "entraînement des nitrates".

Les reliquats après récolte montrent une hiérarchie correspondant aux classements d'aptitude des sols, mais les teneurs varient pendant l'automne et l'hiver en fonction des types de sols. Ces résultats mettent en évidence la difficulté d'utiliser la mesure des reliquats à la sortie de l'hiver pour raisonner la fertilisation azotée d'une culture de printemps (méthode du bilan prévisionnel) ; à cet égard en Lorraine, la Chambre Régionale d'Agriculture a proposé, pour la culture du maïs, l'utilisation d'une méthode du bilan simplifiée utilisant l'azote prélevé par un témoin sans azote pour estimer les fournitures azotées des sols (Desvignes, 1993 ; Limaux, 1994).

Tableau 4.3 : bilan de l'azote dans les différents sols étudiés

Parcelle sur :	Sols Classes	N prélevé kg N ha ⁻¹	reliquats de N-NO ₃ en kg ha ⁻¹			Min. App.* kg N ha ⁻¹
			récolte	sortie de l'automne	sortie de l'hiver	
Portlandien apport 125 kg N ha ⁻¹	RENDOSOL hypo- calcaire (III, B)	182	6	3	6	120
	CALCISOL (II, B⇒A)	208	11	14	35	122
	NEOLUVI- SOL (II, A)	234	44	28	48	168
Kimmérid- gien apport 110 kg N ha ⁻¹	RENDOSOL (III, B)	156	15	9	9	107
	CALCOSOL (VI, C)	91	26	23	17	45
Vallée de l'Aire apport 150 kg N ha ⁻¹	FLUVIOSOL (II, A)	208	97	65	67	163

* Minéralisation apparente = (N prélevé + N reliquat récolte) - (N engrais apporté + N reliquat sortie d'hiver)

Afin d'effectuer le bilan des entrées et sorties d'azote dans les différents sols nous avons calculé une valeur que nous avons appelé minéralisation apparente (Min. App.). La formule de calcul est celle présentée par Olfs et Werner (1992) pour estimer la minéralisation nette pour la culture du blé ; à savoir :

Min. nette = (N prélevé + reliquats à la récolte) - (N min. du sol au printemps d'un témoin sans azote)

Nous avons modifié le deuxième terme de la formule et nous proposons l'équation suivante :

Min. App. = (N prélevé par le maïs + reliquats à la récolte) -
(quantité de N engrais apporté prélevé par la culture + N
minéral présent à la sortie de l'hiver).

En effet, nous admettons :

- une efficacité moyenne du fertilisant de 50% (Carlotti, 1992), et
- du fait d'un précédent maïs, que l'azote minéral disponible à la
sortie de l'hiver reflète bien la valeur des reliquats de l'année
précédente.

Les résultats sont exprimés dans le tableau 4.3. Notons que les
valeurs de Min. App. obtenues pour les RENDOSOLS et le CALCISOL,
sont pratiquement similaires (entre 107 et 122 kg N ha⁻¹) ; ces sols
appartiennent aux classes d'aptitudes culturales intermédiaires. Les
sols ayant les meilleures classes d'aptitudes, le NEOLUVISOL et le
FLUVIOSOL, ont des valeurs plus élevées, respectivement 168 et 163 kg
N ha⁻¹. Enfin, le sol à plus faible aptitude (CALCOSOL) présente les
valeurs les plus faibles, soit 45 kg N ha⁻¹. Ces valeurs sont bien sûr
relatives, car nous n'avons pas suffisamment de mesures pour
déterminer la minéralisation nette ; cependant les tendances obtenues
confirment bien nos classements de potentialités ; nous aurions donc
une relation entre minéralisation de l'azote et potentialité des sols, cette
relation a déjà été constatée par d'autres chercheurs travaillant sous
conditions contrôlées avec divers sols (Vong *et al.*, 1989 ; Jacquin et
Vong, 1990 ; Chéloufi, 1991 ; Sulce, 1993 ; Alfaia, 1993).

* * * * *

Aussi nous avons complété l'étude du bilan par la détermination
de la cinétique des rapports N-NO₃/Nt (%) pour les sept prélèvements
espacés dans le temps (fig 4.2). Notons à nouveau le détachement des
deux sols à meilleure potentialité : le NEOLUVISOL et le FLUVIOSOL ;
en effet, ces sols montrent des rapports supérieurs aux autres surtout
pendant la période de croissance du maïs ; durant cette période les
RENDOSOLS montrent des valeurs intermédiaires (plus élevées dans le
RENDOSOL très carbonaté du Kimméridgien) ; le CALCISOL et le
CALCOSOL présentent les plus petits rapports.

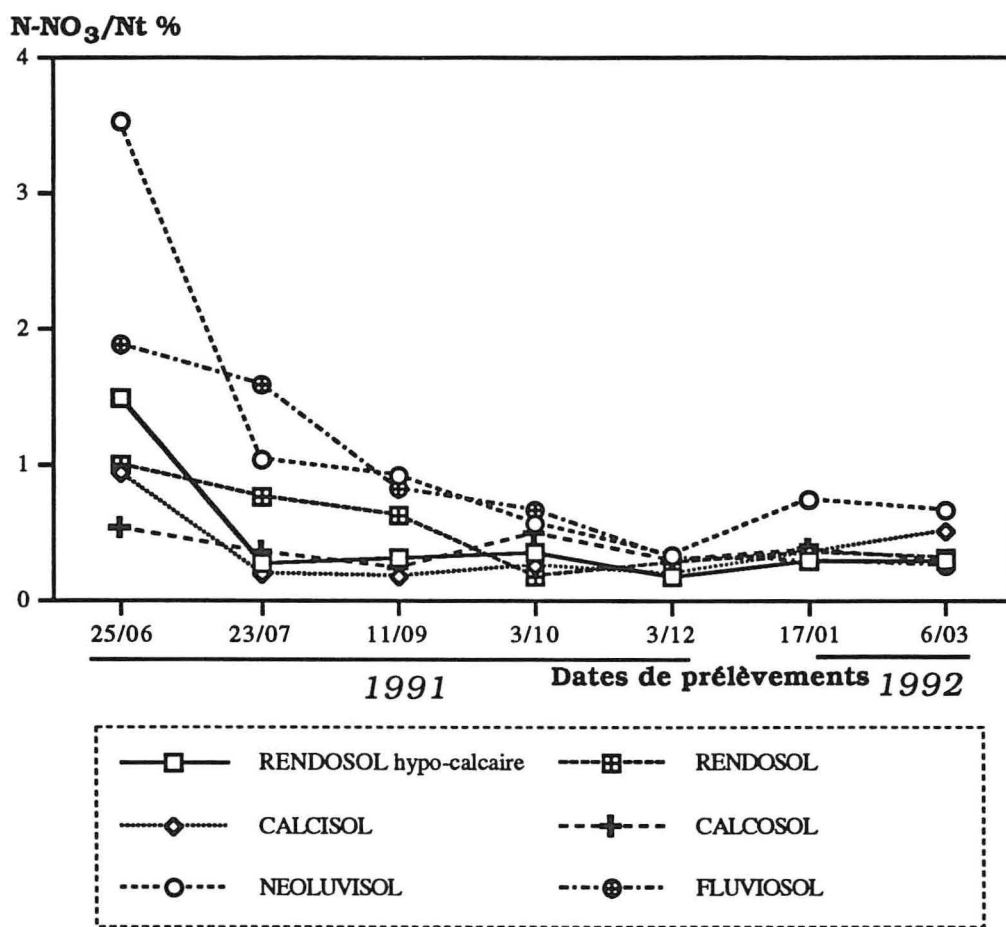


fig. 4.2 : rapport N-NO₃ et N total dans l'horizon de labour des six sols étudiés

Nous constatons que ce rapport, exprimant à la fois les minéralisation primaire et secondaire des sols, est cohérent avec nos classements d'aptitudes culturales des sols, sauf pour le CALCISOL ; ce dernier montre une cinétique de minéralisation semblable à celle du CALCOSOL, pourtant à aptitude culturale plus mauvaise ; l'effet teneur en argile pour le CALCISOL et drainage déficient pour le CALCOSOL, paraissent jouer un rôle important. Signalons aussi un effet parcellaire qui se détache (fig 4.2). Les sols de la parcelle du Portlandien montrent une chute brusque des rapports à partir du premier prélèvement, tandis que les sols du Kimméridgien et de la vallée de l'Aire, montrent une diminution graduelle et progressive. Considérant les valeurs du rapport N-NO₃/Nt à la sortie de l'hiver, soit le dernier prélèvement, la hiérarchie des aptitudes des sols est assez bien respectée. En effet, le NEOLUVISOL obtient le meilleur rapport (0,67%), ensuite le CALCISOL présente des valeurs intermédiaires (0,51%) et les trois sols à plus

faibles potentialités montrent des petites valeurs (0,29 à 0,31% pour les RENDOSOLS et 0,30% pour le CALCOSOL). Notons cependant le cas du FLUVIOSOL, lequel possède une bonne potentialité et présente un rapport de 0,39% ; les fortes teneurs en matière organique et N total (respectivement 3,68 et 0,45%) peuvent être à l'origine de cette constatation, liée à l'histoire culturelle de cette vieille prairie permanente remise en culture récemment.

4.3.4. RISQUES D'ENTRAÎNEMENT DES NITRATES

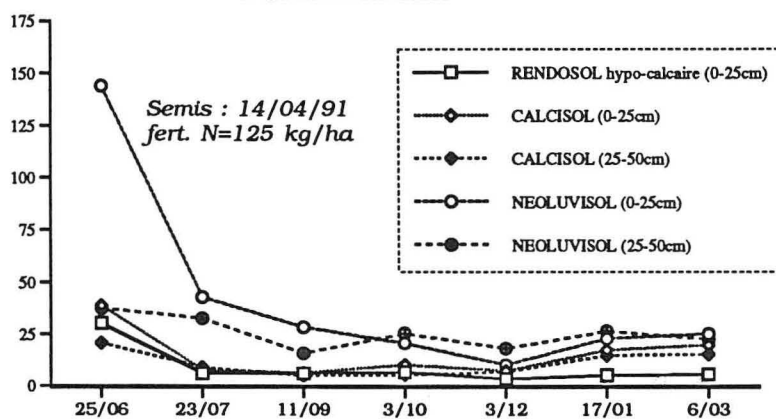
Si notre objectif principal était bien de déterminer la potentialité, il nous a paru nécessaire de voir s'il y avait conformité entre potentialité et risques environnementaux.

La planche 4.2 montre plus en détail les différentes cinétiques de N-NO₃ pour chaque sol et pour chaque parcelle. Nous différencions les deux profondeurs de sols échantillonnés (exception faite pour les sols superficiels). Rappelons que sur chaque parcelle la conduite culturale a été homogène.

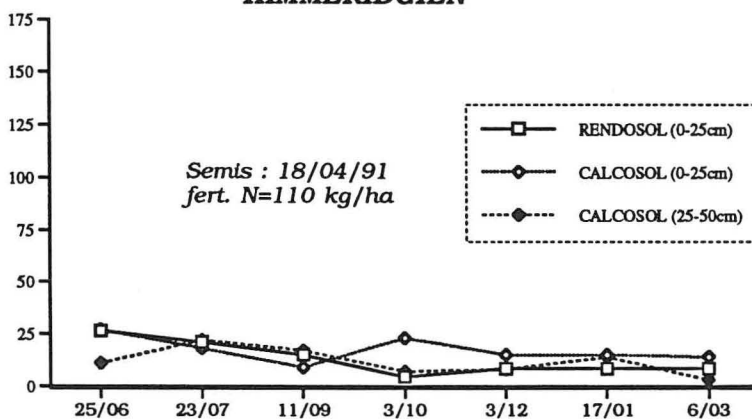
Sur la parcelle du Portlandien nous observons à nouveau que le NEOLUVISOL présente des teneurs en nitrates plus élevées, conditions qui le différencie nettement du RENDOSOL hypo-calcaire et du CALCISOL ; ce fait se traduit sur les rendements obtenus : respectivement 18, 14 et 16 t M.S.ha⁻¹ (tableau 3.6 ; fig 3.3 du chapitre III). Au niveau de l'azote nitrique disponible dans le sol à la récolte (reliquats), le NEOLUVISOL se situe à environ 44 kg N ha⁻¹ tandis que le CALCISOL et le RENDOSOL hypo-calcaire n'ont que respectivement 12 et 6 Kg N ha⁻¹ (tableau 4.3). Ceci pourrait entraîner un risque de lixiviation des nitrates ; en effet dans le NEOLUVISOL on constate qu'à partir du prélèvement du 3 octobre les teneurs en nitrates dans le deuxième horizon de ce sol (25-50cm) sont un peu plus élevées que dans le premier soit environ 5 kg N ha⁻¹ de plus ; ce fait coïncidant avec le début d'une période de pluies excédentaires (planche 4.1) et cette situation s'observe jusqu'au mois de décembre, pour disparaître à l'entrée de l'hiver. Il faut noter cependant que la profondeur de ces sols

N-NO₃ kg ha⁻¹

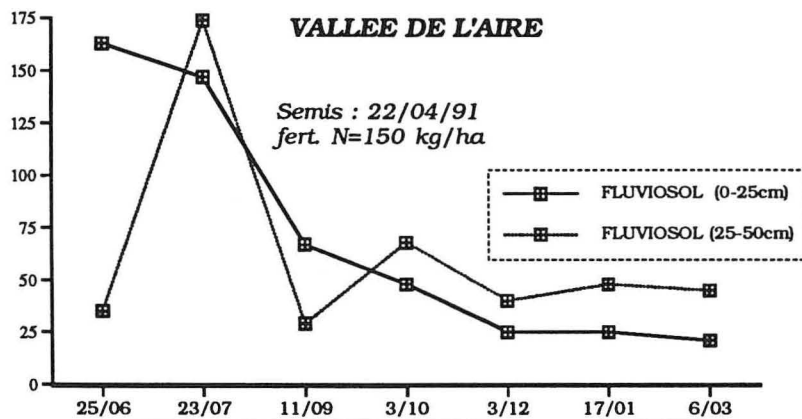
PORTLANDIEN



KIMMERIDGIEN



VALLEE DE L'AIRE



1991

1992

Dates des prélèvements

25/06 : stade 6 feuilles

23/07 : floraison femelle

11/09 : récolte

Planche 4.2 : suivi des nitrates des trois parcelles sous culture de maïs dans le secteur du Barrois

ainsi que celle de l'enracinement, sont importantes, ce qui provoquerait un rôle tampon. En effet, le comportement hydrique et les risques de lixiviation des nitrates dans ce NEOLUVISOL sont affectés par la présence d'un horizon argilique (Bt), qui freine la migration verticale de l'eau ; de même la remontée capillaire à certaines époques n'est pas exclue.

Il faut également mentionner que l'absence de teneurs élevées en nitrates dans le CALCISOL et les RENDOSOLS dès le premier prélèvement, n'indique pas nécessairement une absence de lixiviation car une partie, non négligeable de l'azote engrais, qui n'a été ni absorbée ni organisée, a certainement été lixiviée pendant la petite période des pluies excédentaires du mois de juin.

* * * * *

Sur le sous-secteur du Kimméridgien nous avons suivi deux sols : un RENDOSOL et un CALCOSOL. Pour le RENDOSOL nous notons un comportement similaire à celui du RENDOSOL du Portlandien (planche 4.2). Par ailleurs, les faibles teneurs en nitrates dans les deux horizons du CALCOSOL, nous permettent de confirmer l'importance de l'organisation et la faiblesse des processus de minéralisation secondaire. Néanmoins en fonction de la topographie et de la faible perméabilité de ce sol liée à une structure massive, les risques d'entraînement latéraux après apport d'engrais ont pu et peuvent se produire lors de précipitations printanières ou estivales.

* * * * *

Dans le cas du sol alluvial nous trouvons en juin des quantités de nitrates très élevées dans l'horizon superficiel, liées vraisemblablement à son histoire culturale (retournement récent d'une vieille prairie permanente) ; après récolte, on note toujours des teneurs élevées en nitrates dans le profil coïncidant avec la période drainante (planches 4.1 et 4.2). Il nous faut recourir au détail des précipitations décennales (annexes I-17), pour expliciter le pic de nitrates présent au 23/07/91 dans l'horizon inférieur de ce FLUVIOSOL argilo-limoneux ; nous émettons donc l'hypothèse qu'une précipitation orageuse peut expliquer le transfert de l'onde des nitrates en-dessous de l'horizon cultivé. En outre ce sol de vieille prairie peut voir ses réserves organiques de profondeur se minéraliser sans absorption immédiate par le système racinaire.

Du fait des valeurs plus élevées en nitrates dans l'horizon plus profond de ce type de sol constitué par des matériaux filtrants, les

risques de lixiviation des nitrates sont très importants ; de plus ce type de sol, situé dans la vallée, va recevoir des nitrates provenant des terres environnantes situées en amont ; nous pouvons donc mentionner que malgré les bonnes potentialités naturelles de ces sols, leur fertilisation azotée doit être particulièrement surveillée ; il s'agit donc sans doute d'une zone vulnérable.

* * * * *

Il faut pour les différents sols étudiés, étant donné l'hétérogénéité parcellaire, développer des approches de potentialités au niveau de la parcelle. Le raisonnement rigoureux de la fertilisation azotée en prenant en compte les potentialités des sols, les risques écologiques d'entraînement des nitrates et l'hétérogénéité parcellaire, est donc absolument nécessaire (Jacquin *et al*, 1993).

* * * * *

Turin (1991) analysant la pollution en nitrates des eaux souterraines en Lorraine constate que les chiffres de pollution sont en hausse de 1976 à 1981 diminuant ensuite de 1981 à 1986 date à laquelle s'arrête l'étude et ceci dans trois des quatre départements (Moselle, Meurthe-et-Moselle et Meuse), le quatrième département (Vosges) n'ayant pas suffisamment de résultats pour conclure. Dans le cas de la Meuse ce même auteur après analyse qualitative des différentes nappes hydrogéologiques (fig 4.3), montre que les alluvions, généralement peu épaisses, sont rapidement pénétrées par l'eau de ruissellement ou l'eau des cours d'eau ; le transfert de l'eau et des substances est donc très rapide ; ceci rend les nappes alluviales très vulnérables par rapport à la pollution des aquifères. Les eaux des nappes sous Portlandien du fait de la fissuration des calcaires sont très vulnérables et nous constatons des teneurs en NO₃ importantes. Par contre les nappes du Kimméridgien du fait de l'alternance lithologique (calcaires, marnes) sont moins vulnérables (fig 4.3).

Si nous examinons à la lumière des contraintes européennes, ces nappes aquifères on constate que les teneurs en nitrates sont toujours en dessous de 20 mg et présentent une certaine stabilité dans le temps, notamment au cours des années 80.

En ce qui concerne la nappe alluviale située sous des FLUVIOSOLS, nous avons vu que ces sols étaient à très bonne potentialité, mais vulnérables quant à la qualité des eaux. A l'opposé les sols situés sur le Kimméridgien présentent les plus faibles potentialités et possèdent des nappes avec les plus faibles teneurs en

nitrate ; il conviendrait donc d'appliquer une fumure raisonnée en fonction des potentialités pour protéger les nappes.

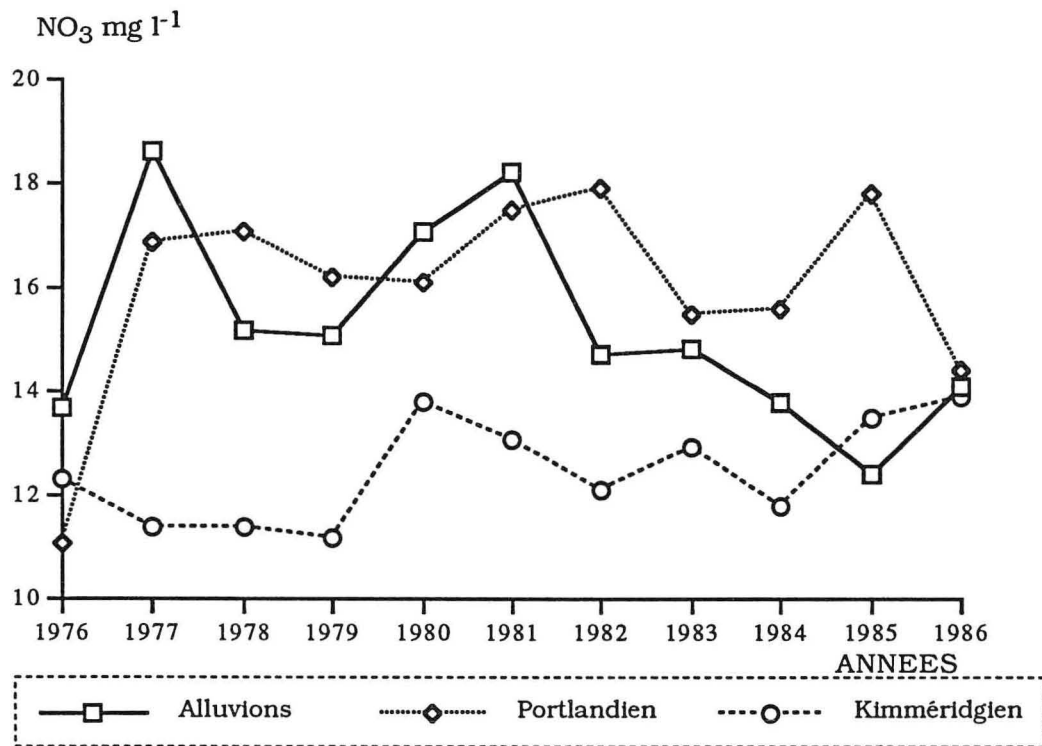


Fig 4.3 : évolution de la teneur en nitrates de trois nappes du secteur du Barrois (source : Turin, 1991)

Sur Portlandien nous distinguons toute la hiérarchie des potentialités : le NEOLUVISOL à bonne potentialité, le CALCISOL à potentialité intermédiaire et le RENDOSOL à potentialité médiocre, et ceci sur des matériaux géologiques karstiques. Leur répartition spatiale en fonction de notre inventaire cartographique (voir carte des sols 1 : chapitre III), montre une hétérogénéité des sols même au niveau parcellaire, il est donc logique que des itinéraires techniques pratiqués de façon identique à l'intérieure d'une même parcelle, présentant une hétérogénéité des potentiels, et basés souvent sur une espérance d'objectif de rendement maximum, entraînent des risques de lixiviation des nitrates hiérarchisés.

* * * * *

Dans la planche 4.3 nous présentons les résultats obtenus du suivi des nitrates dans le BRUNISOL MESOSATURE du sous-secteur d'Uzemain pour la campagne 1992/93. Sur ces sols, les risques d'entraînement des nitrates sont élevés ; en effet, nous notons une augmentation des nitrates en profondeur (deuxième et troisième horizon) dès le prélèvement correspondant au stade huit feuilles (23/06). Ce fait est moins évident pour les prélèvements du 17/07 et 23/07 et disparaît définitivement à la récolte. Observant les grandes quantités de nitrates en profondeur dans le prélèvement du 26/06, nous pouvons nous interroger sur le devenir de cet azote . Une grande partie a dû être utilisée par la culture (rendements équivalents à 18 t M.S. ha⁻¹ soit environ 234 kg N ha⁻¹ prélevés par le maïs) car cette époque correspond à l'absorption maximale d'azote par la plante. Une seconde partie a certainement migré plus profondément, lixiviée par les pluies ; en effet, après un analyse décadaire de la différence P-ETP, nous observons deux décades excédentaires : la première décade de juin et la première décade de juillet (cf. annexes I-17). Les pluies orageuses de la première décade de juin peuvent avoir provoqué l'entraînement constaté le 26/06. Une fois, la culture bien établie l'entraînement des nitrates n'est plus aussi évident. Bien que nous ayons décelé seulement une période de lixiviation des nitrates pour cette année climatique dans ces sols très perméables, l'utilisation des résidus de récolte, telle que la paille, pour piéger les nitrates, surtout pendant les périodes qui précèdent le stade huit feuilles est envisageable ; de même, des apports tardifs d'azote engrais sont conseillés (Jacquin et Vong, 1990 ; Chéloufi *et al.*, 1990 ; Carlotti, 1992).

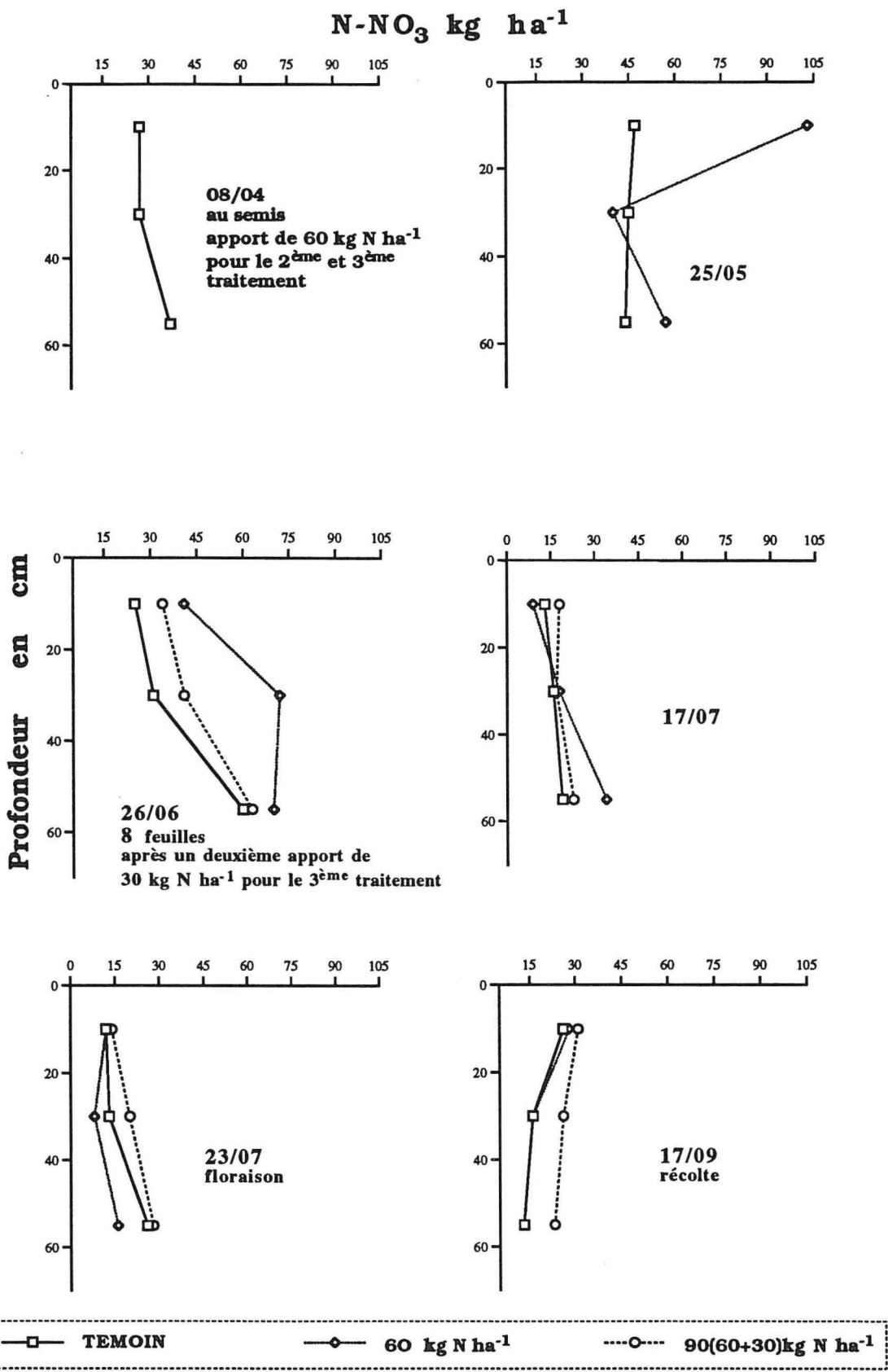


Planche 4.3 : suivi des nitrates dans un BRUNISOL MESOSATURE sous culture de maïs dans le secteur des Vosges (1992).

4.4. CONCLUSIONS

Nous constatons une corrélation entre les classes d'aptitude culturale et les teneurs en azote total des sols exprimées en kg ha^{-1} ; d'autre part nous observons une certaine relation entre pourcentage de N total et degré de carbonatation des sols.

Le suivi des teneurs en nitrates dans les sols des deux secteurs nous a permis de constater qu'il existait une relation directe entre les potentialités des sols et ces teneurs en nitrates, mais également avec les rythmes de minéralisation. Les sols à meilleures potentialités présentent les teneurs en nitrates les plus élevées, même après récolte ; ce fait peut conduire à une situation difficile à gérer si l'on considère les risques de lixiviation des nitrates, ces derniers étant estimés par la présence d'azote nitrique disponible dans les sols à la récolte ou à la sortie de l'hiver ; en effet, si cet indicateur a une valeur agronomique relative il présente un intérêt face aux risques environnementaux. Pour les sols à potentialités intermédiaires ou médiocres, les problèmes de lixiviation des nitrates se présentent essentiellement avant la période maximale de prélèvement d'azote par le maïs ; en effet, nous avons constaté pour ces sols (CALCISOL, RENDOSOL, CALCOSOL et BRUNISOL), la disparition d'une grande partie de l'azote minéral disponible avant le stade huit feuilles. Ce fait peut aussi être lié dans certains types de sols à un fort pouvoir d'organisation biologique microbienne de l'azote engrais.

D'autre part cette étude du suivi des nitrates dans les différents types de sols rencontrés sur une même parcelle nous a permis de confirmer que l'hétérogénéité parcellaire soulignée dans le chapitre III, se manifeste aussi dans le domaine du cycle interne de l'azote dans le sol ; cette diversité donc de potentialités agricoles des sols, liée à l'aspect cinétique des teneurs en nitrates, doit être prise en compte pour moduler les objectifs de rendement donc la fertilisation azotée ; en effet, il est illogique de procéder à des itinéraires techniques identiques, notamment en ce qui concerne les apports de fertilisants azotés, pour un RENDOSOL, un CALCISOL et à plus forte raison un NEOLUVISOL. Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour optimiser ces apports d'intrants (Jacquin *et al*, 1993).

Nous avons comparé nos résultats avec les teneurs en nitrates décelées dans les nappes phréatiques du département de la Meuse

(Turin, 1991) ; cet auteur montre une plus grande vulnérabilité écologique des nappes alluviales et de celles présentes sous Portlandien. Nous constatons que le FLUVIOSOL sur alluvions et le NEOLUVISOL sur Portlandien, sont les sols présentant le maximum de potentialité, mais en fonction de leurs écosystèmes naturels, nappe alluviale ou lithologie de type karstique, ils présentent un certain risque écologique ; aussi le raisonnement des doses et surtout les techniques d'apport d'azote dans ces sols très productifs doivent être rigoureux ; de plus il est indispensable de tenir compte de l'hétérogénéité spatiale des sols rencontrés sur ces formations géologiques, afin de diminuer les risques de pollution nitrique de ces nappes. La nappe sous Kimméridgien est protégée par les marnes, mais l'existence d'un lessivage latéral reste à préciser.

Sur le plan recherche l'étude du bilan azoté nous a permis de mettre en évidence l'importance des processus d'organisation biologique microbienne, mais également la faiblesse du taux de reminéralisation de l'azote engrais organisé dans certains sols à faible potentialité agricole.

Aussi à partir de ces résultats nous éprouvons la nécessité d'approfondir nos investigations sur le devenir des engrais azotés au cours du cycle interne de l'azote dans des sols à potentialités différentes ; ceci afin de hiérarchiser les diverses variables pouvant affecter l'optimisation de la fertilisation azotée pour les cultures.

**CHAPITRE V : DETERMINATION DE L'EFFICIENCE D'UN
FERTILISANT AZOTE (NH₄NO₃) EN CONDITIONS DE PLEIN CHAMP
DANS DES SOLS DE L'EST DE LA FRANCE ET DE LA REGION
TROPICALE HUMIDE DU MEXIQUE.**

5.1. INTRODUCTION

L'importance de la production du maïs en France et au Mexique n'est pas négligeable avec respectivement 3,5 et 6,3 millions d'hectares mis en culture en 1990 (Herjean, 1993). En Alsace et en Lorraine le maïs représente 16% de la surface nationale avec 8% de maïs grain et 8% de maïs ensilage (Agrifutur, 1993). Par contre au Mexique, l'Etat de Tabasco, localisé dans la région tropicale, ne participe que faiblement à la production nationale avec 0.9% de surface totale de production de maïs (SARH, 1991). Les écarts de rendements entre ces deux pays sont importants avec respectivement 6,2 et 2,06 t. ha⁻¹ de maïs grains pour la France et le Mexique. (Données de la FAO, 1990, citées par Herjean, 1993). Selon la FAO (1980), l'augmentation de la production au Mexique devra être basée sur l'utilisation rationnelle des engrais azotés. En France par contre la diminution des charges et le maintien de la qualité de l'environnement sont actuellement les deux préoccupations majeures des producteurs de maïs (Sébillotte et Meynard, 1990).

Pour la fertilisation azotée du maïs, le bilan prévisionnel (Rémy et Hébert, 1977 ; Rémy et Viaux, 1983), tel qu'il est utilisé sur céréales n'a pas donné des résultats suffisamment fiables (Desvignes, 1992) ; cette imprécision est liée au manque de renseignements sur l'époque à laquelle sont mesurés les reliquats de l'année précédente et sur la méthodologie à employer pour mesurer l'azote libéré par minéralisation de l'humus (Desvignes, 1992 et Delphin, 1993). Les essais conduits ces dernières années en Alsace et en Lorraine ont permis, pour certaines situations de préciser les fournitures d'azote par le sol (Koller 1991 ; Limaux 1991 ; Desvignes 1993). Ainsi, il est possible de proposer une méthode du bilan simplifiée permettant d'ajuster la dose d'azote au potentiel de la région et à l'itinéraire technique (Carlotti, 1992 ; Desvignes, 1992).

Ce bilan prend en compte les éléments suivants :

- les besoins (by) en azote du maïs qui varient en fonction du potentiel du sol

- les fournitures d'azote (fs) par le sol qui varient avec les types de situation (texture, climat, précédent...)

La différence by-fs doit être comblée par les apports d'engrais, mais il faut tenir compte du coefficient d'utilisation de l'engrais (Desvignes, 1993)

Dans la structure de ce bilan remarquons d'abord l'importance de la détermination de la potentialité du sol pour pouvoir calculer les besoins en azote du maïs (rendements potentiels) et les fournitures en azote du sol. Par ailleurs, remarquons aussi la nécessité de bien connaître le coefficient d'efficacité de l'engrais azoté à apporter.

Dans le chapitre III nous avons vu comment il est possible à partir d'études agro-pédologiques, de déterminer la potentialité agricole des sols, à l'aide des classifications d'aptitude culturale des sols et d'analyses fréquentielles des éléments climatiques intervenant sur la production agricole ; ceci nous permet alors de prédire les besoins en azote du maïs.

Dans cette partie nous essaierons de montrer comment, avec des expérimentations classiques de fertilisation azotée et à l'aide de l'isotope ^{15}N (Hauck et Bremner, 1976 ; Guiraud, 1984 ; Zapata, 1990 ; Ganry, 1990), nous pouvons arriver à connaître : les coefficients d'efficacité d'un fertilisant azoté, les fournitures en azote des sols, les différences de potentialité agricole des sols et les interactions existantes entre les fertilisants azotés et l'azote endogène dans le cycle interne de l'azote des sols agricoles.

Ainsi nous avons choisi, pour deux régions du Nord-Est de la France (la Lorraine et l'Alsace) et la région tropicale humide du Sud-Est du Mexique (Etat de Tabasco), les principaux types de sols cultivés en maïs pour y suivre, pendant deux années culturales (1992 et 1993) dans le cas de la France et une année culturale (1992) dans le cas du Mexique, des protocoles de terrain visant à mesurer les caractéristiques citées ci-dessus.

5.2. MATERIELS ET METHODES

5.2.1. LES SITES D'ETUDES.

Les expériences ont toutes été réalisées sur maïs. Pour les régions françaises (Lorraine et Alsace), les expériences ont été répétées deux années consécutives (1992 et 1993), en liaison étroite avec les organismes agricoles de ces deux régions. Pour la région tropicale du Mexique les expériences ont été conduites seulement pendant l'année 1992, en liaison avec le Centre Régional du Sud-Est du Colegio de Postgraduados (CEICADES). Les sites d'étude, les types de sols (d'après le Référentiel Pédologique de l'AFES, 1992) et l'année culturale, sont présentés dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : types de sols, sites et années d'étude

Région	Sols		Sites	Années
Région Lorraine (France)	FLUVIOSOL TYPIQUE limono-sableux		Dommartin (site1)	1992
			Dieulouard (site 2)	1993
	RENDOSOL argilo-limoneux		Loisy (site3)	1992
			Noviant (site4)	1993
	NEOLUVISOL limono-argileux		Bouzule (site 5 ₁ *)	1992
			Bouzule (site 5 ₂)	1993
PELOSOL BRUNIFIE	sols très argileux	Bouzule (site 6)	1992	
CALCOSOL vertique		Lagney (site 7)	1993	
Région Alsace (France)	CALCOSOL limoneux		Obernai (site 8 ₁)	1992
			Obernai (site 8 ₂)	1993
	FLUVIOSOL BRUNIFIE Sablo-caillouteux		Meyenheim (site 9 ₁)	1992
			Meyenheim (site 9 ₂)	1993
Région tropicale humide (Mexique)	VERTISOL peu argileux		CEICADES (série "Limon", site 10)	1992
	FLUVIOSOL sablo-argileux		CEICADES (série "Gamas", site 11)	1992

* Le numéro de site suivi d'un indice représente le même site pour les deux années.

Nous présentons dans le tableau 5.2 la classification des différents sols en fonction de leurs caractéristiques (décrites en annexes II-1 à II-10). Leurs classes d'aptitude culturale d'après le Système américain de classification d'aptitude des sols de 8 classes (Klingebiel et Montgomery, 1961 ; IMTA, 1988) et l'approche paramétrique de valeurs des terres de la Région Centre de la France (Lafrechoux, *et al.*, 1983) sont présentées respectivement dans les tableaux 5.3 et 5.4. Les conditions climatiques moyennes des 3 régions d'étude sont présentées dans la planche 5.1. Les clichés 11 à 19 montrent les sols étudiés.

5.2.2. . PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

Les itinéraires techniques sur les différents sites sont présentés en annexe II-11. La fertilisation azotée a été apportée sous forme d'ammonitrate.

En France

Les essais ont été conduits directement sur les terrains des agriculteurs. Le semis de maïs a été réalisé en moyenne au cours de la deuxième quinzaine d'avril (cf. itinéraires techniques : annexe II-11).

Les itinéraires techniques pratiqués sont aussi similaires que possible avec cependant les variantes suivantes :

- apports de fumier en début de rotation pour les sites lorrains (sauf Dieulouard 1993, site 2)
- irrigation sur les sites de Meyenheim et Dieulouard.

Nous avons utilisé des dispositifs en blocs avec 4 répétitions pour cerner la réponse du maïs aux doses croissantes d'azote ; les traitements de chaque dispositif sont présentés dans le tableau 5.5.

La dose X correspond à la dose raisonnée à partir de la méthode du bilan simplifiée ; elle varie pour chaque type de sol en fonction de ses potentialités et des précédents.

La surface de chaque parcelle expérimentale était de 56 m² soit 7 rangs (0,8 m entre les rangs) sur 10 mètres ; l'engrais a été appliqué sur toute la surface de la parcelle.

Dans le cas des sols alsaciens il nous faut mentionner que les

Tableau 5.2 : classification taxonomique des sols étudiés

SITES	Classification française : (C.P.C.S., 1967)	Classification française : Référentiel pédologique (A.F.E.S., 1992)	Classification Américaine : "Soil Taxonomy" (Soil Survey Staff, 1992)	Légende de la carte mondiale des sols (F.A.O., 1989)
1) DOMMARTIN 1992 et 2) DIEULOUARD 1993	Sol d'apport alluvial récent limono- sableux	FLUVIOSOL TYPIQUE saturé, limono-sableux, cultivé.	Udifluent typique ; Loameux fin- mixte-mésique.	Fluvisol eutrique
3) LOISY 1992 et 4) NOVIANT 1993	Rendzine modale argilo-limoneuse sur calcaires du Bajocien	RENDOSOL pachique, caillouteux, argilo-limoneux, cultivé, issu des calcaires du Bajocien.	Rendoll Eutrochreptique ; loameux squelettique-mixte-mésique.	Leptosol cambi-rendzique
5 ₁) et 5 ₂) BOUZULE 1992 et 1993	Sol brun lessivé à pseudogley de limon des plateaux, limono-argileux	NEOLUVISOL eutrique, saturé, rédoxique, limono-argileux, cultivé, issu de limon des plateaux sur Lias.	Hapludaf aquique ; argileux-mixte- mésique.	Luvisol gleyi-haplique
6) BOUZULE 1992	Sol brun modal très argileux sur marnes	PELOSOL BRUNIFIE très argileux, saturé, peu perméable, rédoxique, cultivé, issu de marnes du Lias inférieur.	Chromudert aquique ; argileux- mixte-mésique.	Cambisol gleyi-vertique
7) LAGNEY 1993	Sol brun calcaire vertique très argileux sur marnes	CALCOSOL vertique, très argileux, peu perméable, pachique, rédoxique, issu de marnes	Chromudert aquique ; argileux- mixte-mésique.	Cambisol calcari-gleyi-vertique
8 ₁) et 8 ₂) OBERNAI 1992 et 1993	Sol brun calcaire limoneux profond sur loess	CALCOSOL pachique, limoneux, cultivé, issu de loess.	Eutrochrept typique ; loameux fin- mixte-mésique.	Cambisol calcarique
9 ₁) et 9 ₂) MEYENHEIM 1992 et 1993	Sol brun alluvial sablo-caillouteux	FLUVIOSOL BRUNIFIE saturé, sablo-caillouteux, cultivé, irrigué.	Eutrochrept fluventique ; loameux squelettique-mixte-mésique.	Cambisol fluvi-eutrique
10) CEICADES SERIE "LIMON" MEXIQUE 1992	Vertisol à structure angulaire et drainage externe réduit hydromorphe	*VERTISOL peu argileux, subsaturé, rédoxique, drainé, cultivé, fluvi- sur alluvions récentes	Chromudert aquentique ; argileux- montmorillonitique- isohyperthermique ; série "Limon".	Vertisol fluvi-eutrique
11) CEICADES SERIE "GAMAS" MEXIQUE 1992	Sol d'apport alluvial récent sablo- argileux	FLUVIOSOL TYPIQUE sablo- argileux, peu acide, méso-saturé, drainé, cultivé.	Tropofluent typique ; loameux grossier-mixte-isohyperthermique ; série "Gamas".	Fluvisol cambi-eutrique

* Du fait que le référentiel pédologique ne présente pas encore cette référence le nom attribué ici est provisoire.

Tableau 5.3 : classification des aptitudes culturales des sols étudiés selon la méthode américaine de 8 classes (I.M.T.A., 1988)

SOLS/SITES	CLASSES	FACTEURS LIMITANTS
FLUVIOSOL TYPIQUE limono- sableux/ 1) Dommartin 1992 2) Dieulouard 1993	II S ₁ S ₈ D ₂	Texture à tendance sableuse ; fertilité potentielle (CEC < 16) ; inondation occasionnelle.
RENDOSOL argilo- limoneux/ 3)Loisy 1992 4) Noviant 1993	IV S ₂ S ₅ S ₆	Profondeur exploitable par les racines (50-75 cm) ; pierrosité dans le profil (<60%) ; pierrosité superficielle (< 20 %).
NEOLUVISOL limono-argileux / 5 ₁ et 5 ₂ Bouzule 1992- 93	III S ₂ S ₈ S ₁ D ₄	Profondeur exploitable par les racines (75-100 cm) ; fertilité potentielle (CEC < 16) ; texture limoneuse à tendance battante ; perméabilité modérément lente en sous-sol.
PELOSOL BRUNIFIE très argileux/ 6) Bouzule 1992	VI S ₂ D ₄ T ₁ S ₁	Profondeur exploitable par les racines (25-50 cm) ; perméabilité très lente ; pente (4-7%) ; texture argileuse.
CALCOSOL vertique très argileux/ 7) Lagney 1993	IV D ₄ S ₂ T ₁ S ₁ S ₈	perméabilité très lente ; profondeur exploitable par les racines (75-100cm) ; pente (2-4%) ; texture argileuse ; fertilité potentielle (CEC 16-24)
CALCOSOL limoneux/ 8 ₁ et 8 ₂ Obernai 1992-93	II S ₁	Texture limoneuse sensible au tassement.
FLUVIOSOL BRUNIFIE sablo- caillouteux/ 9 ₁ et 9 ₂ Meyenheim 1992-93	III S ₅ D ₄ S ₁ S ₂ S ₈	Pierrosité dans le profil (< 60%) ; perméabilité très rapide ; texture sableuse ; profondeur exploitable par les racines (75-100 cm) ; fertilité potentielle (CEC<16).
VERTISOL peu argileux/ 10) Mexique 1992	IV D ₃ D ₄ S ₁	Nappe phréatique à < 100 cm pendant au moins 3 mois de la saison humide ; perméabilité lente ; texture argileuse.
FLUVIOSOL TYPIQUE sablo- argileux/ 11) Mexique 1992	II S ₈	Fertilité potentielle (CEC<16).

Tableau 5.4 : évaluation de la valeur des sols étudiés (selon l'approche Lafrechoux *et al*, 1983)

SOLS/SITES	CRITERES							Total des points	Classes
	Texture	Teneur en carbonates	Prof. exp. par les racines	Pierrosité	Réserve utile en eau	Hydro- morphie	état calci- que et or- ganique		
FLUVIOSOL TYPIQUE limono-sableux/ 1) Dommartin 1992 2) Dieulouard 1993	20	0	15	10	10	20	9	84	A
RENDOSOL argilo- limoneux/ 3)Loisy 1992 4) Noviant 1993	20	5	10	5	4	20	15	79	B
NEOLUVISOL limono- argileux / 5 ₁ et 5 ₂ Bouzule 1992-93	23	0	15	10	10	15	9	82	A
PELOSOL BRUNIFIE très argileux/ 6) Bouzule 1992	10	0	10	10	8	5	9	52	C
CALCOSOL vertique très argileux/ 7) Lagney 1993	10	5	12	10	9	5	9	60	C
CALCOSOL limoneux/ 8 ₁ et 8 ₂ Obernai 1992- 93	25	5	15	10	10	20	12	97	A
FLUVIOSOL BRUNIFIE sablo-caillouteux/ 9 ₁ et 9 ₂ Meyenheim 1992-93	15	5	13	2	4	20	12	71	B
VERTISOL peu argileux/ 10) Mexique	20	0	15	10	10	5	9	69	B
FLUVIOSOL TYPIQUE sablo-argileux/ 11) Mexique	15	0	15	10	10	20	12	82	A
val. max.	25	5	15	10	10	20	15	100	

Tableau 5.5 : fertilisation azotée pratiquée (NH₄NO₃ en kg ha⁻¹) pour les essais français

Types de sols et sites étudiés												
Doses	FLUVIOSOL TYPIQUE limono-sableux		RENDOSOL argilo-limoneux		NEOLLUVISOL limono-argileux		PELOSOL BRUNIFIE	CALCOSOL vertique	CALCOSOL limoneux		FLUVIOSOL BRUNIFIE sablo-caillouteux	
	sols très argileux											
N	1) Dommartin {1992}	2) Dieulouard {1993}	3) Loisy {1992}	4) Noviant {1993}	5 ₁) Bouzule {1992}	5 ₂) Bouzule {1993}	6) Bouzule {1992}	7) Lagny {1993}	8 ₁) Obernat {1992}	8 ₂) Obernat {1993}	9 ₁) Meyenheim {1992}	9 ₂) Meyenheim {1993}
témoin	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X-90		30										
X-80											140	140
X-60		60	30	20		20		20				
X-40	35		50	40	40	40	25	40	60	60	160	160
X-30		90										
X-20	55		70	60	60	60	45	60	80	80	180	180
X	75	120	90	80	80	80	65	80	100	100	200	200
X+20	95		110	100	100	100	85	100	120	120	220	220
X+30		150										
X+40	115		130	120	120	120	105	120			240	240
X+60	135	180	150	140	140	140	125	140	160	160		
X+80	155				160		145				280	280
X+90		210										

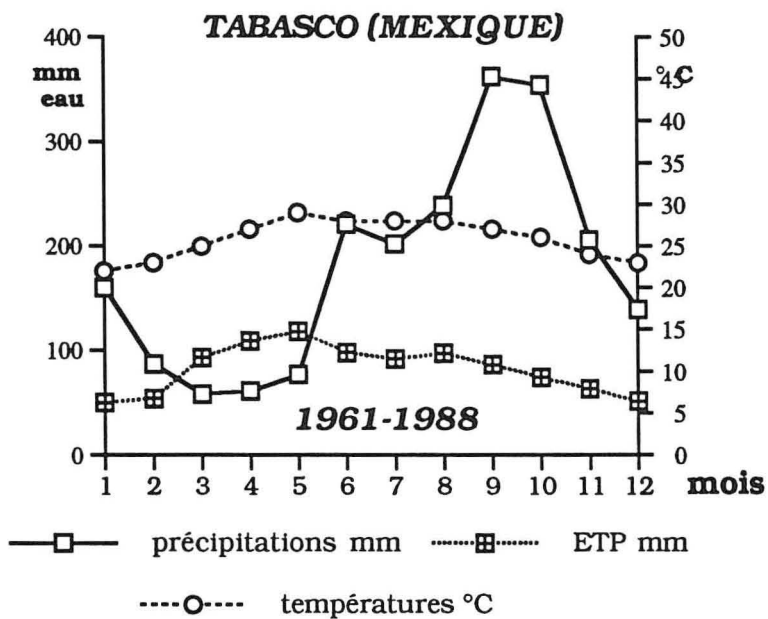
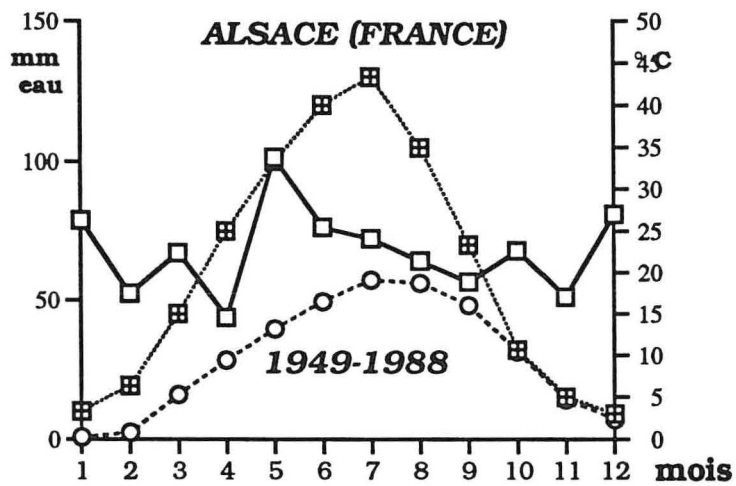
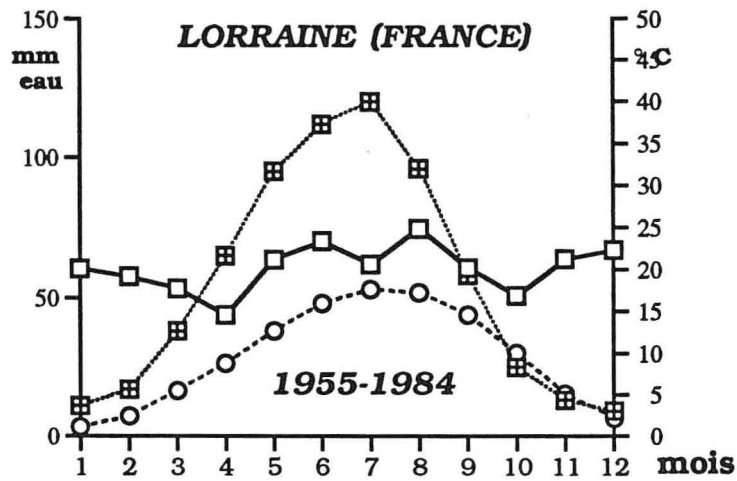


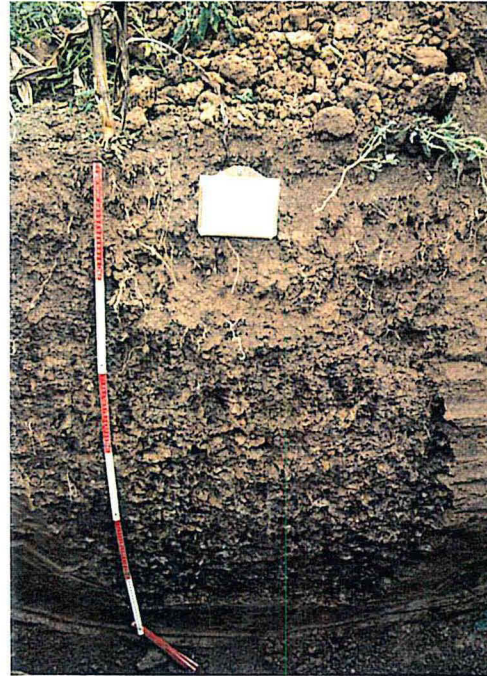
Planche 5.1 : conditions climatiques moyennes pour les trois régions d'études



Cliché 11 : FLUVIOSOL TYPIQUE
limono-sableux

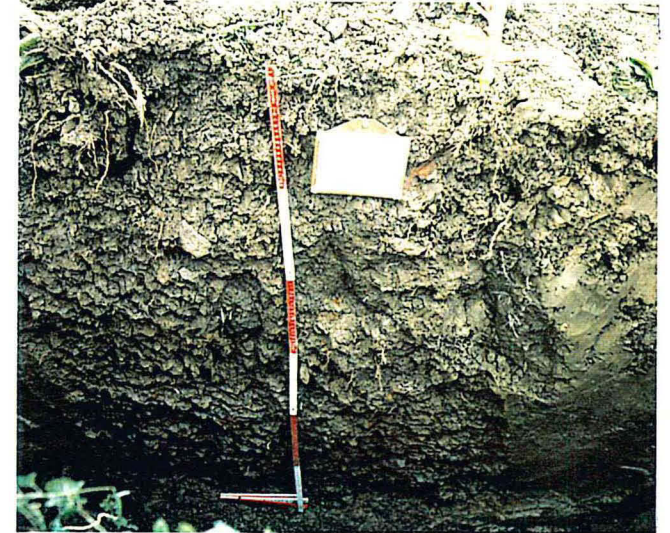


Cliché 12 : RENDOSOL
argilo-limoneux

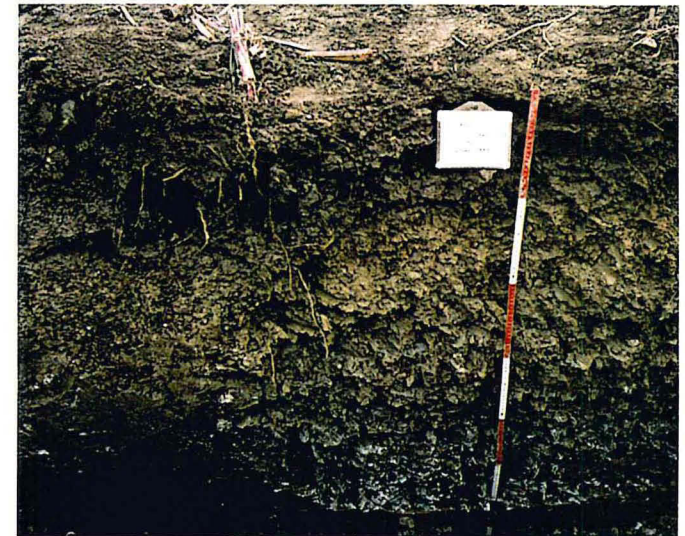


Cliché 13 : NEOLUVISOL
limono-argileux

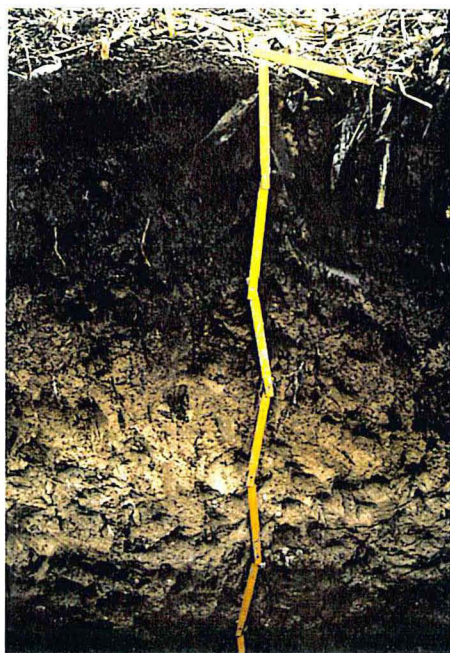
SOLS LORRAINS



Cliché 14 : PELOSOL BRUNIFIE



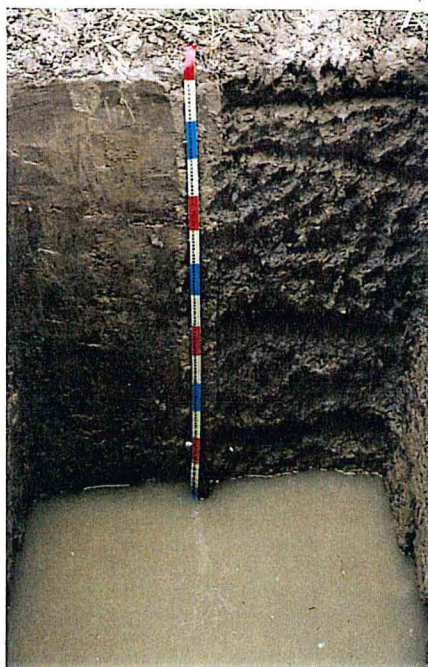
Cliché 15 : CALCOSOL verticale



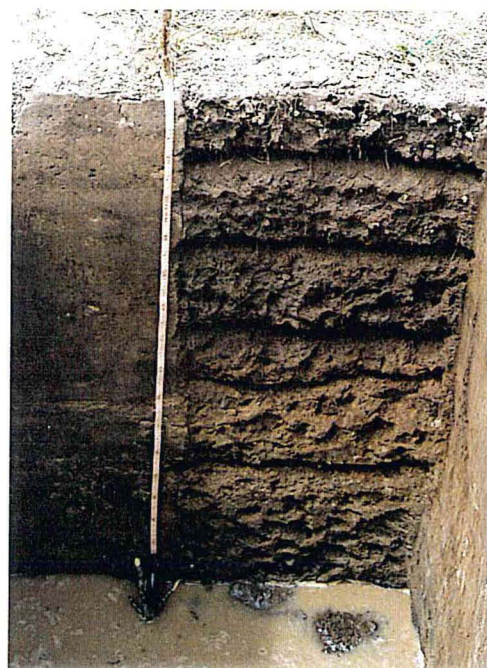
Cliché 16 : CALCOSOL limoneux
(J-P. Party, Sol Conseil)



Cliché 17 : FLUVIOSOL BRUNIFIE
sablo-caillouteux
(J-P. Party, Sol Conseil)



Cliché 18 : VERTISOL
peu argileux



Cliché 19 : FLUVIOSOL TYPIQUE
sablo-argileux

essais ont été répétés en 1993 exactement sur les mêmes parcelles expérimentales qu'en 1992, il s'agit donc en 1993 de témoins double zéro et non de témoins zéro ; ceci a pour conséquence une impossibilité de calculer en 1993 le Coefficient Apparent d'Utilisation de l'engrais (CAU) et de l'*Added Nitrogen Interaction*" (ANI).

Pour mesurer le Coefficient Réel d'Utilisation (CRU) de l'engrais azoté, nous avons effectué un apport de ^{15}N sous forme d'ammonitrate à excès isotopique (E) de 0,32% et 0,29% respectivement pour les années 1992 et 1993 pour les sols lorrains et 0,21% et 0,25% respectivement en 1992 et 1993 pour les sols alsaciens. Pour cela à l'intérieur du dispositif précité nous avons utilisé des micro-parcelles de 6m^2 (2,4 m, soit 3 rangs, sur 2,5 m) et réalisé deux répétitions (cf. annexe II-12). L'apport de ^{15}N a été pratiqué uniquement sur les doses X et X \pm 20 pour l'année 1992 ; en 1993 cherchant à cerner les extrêmes dans les sols lorrains, l'apport a été fait sur la dose X et X \pm 60 (sauf pour le sol de Dieulouard dont l'apport a été fait sur la dose X et X \pm 90). Pour les sols alsaciens l'apport de ^{15}N a été pratiqué en 1993 seulement pour les doses X-20 et X+20 .

Pour les quatre sols lorrains, l'engrais a été apporté au moment du semis ; un traitement supplémentaire a été réalisé pour la dose X avec application de l'engrais au stade 7-8 feuilles. Pour les sols alsaciens, à Obernai l'apport total d'engrais a été effectué au semis, tandis qu'il a été pratiqué en trois fois à Meyenheim (1/3 semis, 1/3 stade 3-4 feuilles, 1/3 stade 6-8 feuilles). Au moment de la récolte chaque micro-parcelle a été divisée en deux pour prélever 4 échantillons. La récolte a été réalisée en moyenne mi-septembre (cf. itinéraires techniques annexe II-11).

Au Mexique

Rappelons qu'au Mexique nous avons conduit les expériences uniquement pendant l'année culturale 1992.

Nous avons utilisé des dispositifs en blocs avec 4 répétitions : les traitements testés pour le site 10) VERTISOL et le site 11) FLUVIOSOL TYPIQUE, sont :

Traitement 1) : dose X-30 (60 kg N ha^{-1})

Traitement 2) : dose X (90 kg N ha^{-1})

Traitement 3) : dose X+30 (120 kg N ha⁻¹)

Traitement 4) : témoin 0 (sans N)

La méthode du bilan n'étant pas utilisée au Mexique, nous avons pris comme dose centrale X (90 kg N ha⁻¹), soit la dose optimale préconisée dans la région par les organismes de recherche, laquelle a été obtenue à partir d'expériences classiques de fertilisation réalisées antérieurement (Barron, 1990).

L'azote minéral a été mesuré dans chaque sol au cours de six périodes et ceci seulement dans les traitements témoin et dose X ; de même l'azote total des parties aériennes du maïs a été déterminé en cinq périodes pour les mêmes traitements.

Le semis de maïs a été réalisé le 10 Juin 1992. Les doses ont été apportées en deux fois : la moitié au stade 2-3 feuilles (19/06/92) et l'autre moitié au stade 7-8 feuilles (13/07/92). Les applications ont été pratiquées en bandes suivant les recommandations régionales (Barron, 1990). La parcelle expérimentale a été constituée de 8 rangs (7,2 m) sur 10 m de longueur.

L'azote quinze a été apporté dans les 3 traitements fertilisés ; l'excès isotopique (E) utilisé a été de 0.29%, sur une micro-parcelle de 3 rangs sur 2 m. de longueur, sur deux blocs du dispositif. Au moment de la récolte chaque micro-parcelle a été divisée en deux afin d'obtenir 4 répétitions. La récolte a été faite le 21/09/92.

5.2.3. VARIABLES MESUREES.

Les variables mesurées sont :

- le rendement (t M.S. ha⁻¹ pour tous les sites, sauf pour les sols mexicains dans lesquels on a mesuré aussi le rendement en kg grains ha⁻¹). Pour définir l'optimum économique de la courbe de réponse nous avons pris comme seuil celui donné par Limaux (1994), soit 0,32 t M.S. pour 60 unités d'azote pour les essais français ; pour les essais mexicains nous avons considéré l'optimum statistique du rendement du grain.

- l'azote prélevé par le maïs à la récolte (kg N ha⁻¹).
- l'azote total des parties aériennes du maïs.
- l'excès isotopique de ¹⁵N des parties aériennes du maïs (séparément pour les tiges+feuilles et les épis ; dans les cas des sols

mexicains on a séparé les grains et le reste des parties aériennes), à la récolte.

- l'azote minéral disponible dans le sol à la récolte (reliquats). Pour les sols lorrains l'azote minéral du sol a été déterminé pour les traitements témoin, X et doses extrêmes d'azote ; jusqu'à 120 cm pour les sols profonds et 40 cm pour les sols superficiels (sites de Loisy et de Noviant). Pour les sols alsaciens l'azote minéral a été mesuré sur tous les traitements et la profondeur de l'échantillonnage a été respectivement de 90 et 50 cm pour les sites d'Obernai et de Meyenheim. Pour les sols mexicains la détermination de N minéral a porté sur 50 cm de profondeur et seulement sur les traitements témoin et X.

- Les variables concernant le cycle interne de l'azote (CAU, CRU, Valeur A, ANI, Ndff, Ndfs) qui seront décrites de façon plus approfondie dans chaque sous-chapitre.

5.2.4. METHODES ANALYTIQUES.

- Azote minéral : Extraction de NO_3 et NH_4 sur sol frais par KCl 1 N et dosage par colorimétrie

- Azote organique total : méthode Kjeldahl proposée par Guiraud et Fardeau (1977)

- Pour les dosages de ^{15}N , les analyses ont été effectuées par le laboratoire du CNRS à Lyon : détermination de N total en % et du rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ sur les échantillons séchés et broyés ; les mesures ont été faites directement sous forme élémentaire au moyen d'un spectromètre de masse.

5.2.5. ANALYSES STATISTIQUES.

L'analyse statistique des résultats a porté sur :

- Analyse de variance (ANVA) et comparaison multiple des moyennes (test Newman-Keuls) sur les variables rendement et azote prélevé par le maïs

- Test de comparaison de 2 moyennes ("t" de Student) pour les résultats de CRU, Ndfs et Valeur A du Sol.

- Analyses de corrélation et régression entre les variables concernant le cycle interne de l'azote dans le sol.

5.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.3.1. RENDEMENTS EN FONCTION DES DOSES D'AZOTE.

En France

Pour l'année 1992 dans les quatre sols lorrains nous n'avons pas obtenu de différence significative entre les traitements lors de l'analyse de variance (tableau 5.6). Bien que l'année climatique 1992 (planche 5.2) ait été favorable à une minéralisation des réserves organiques des sols et des fumiers apportés, les périodes sèches et les fortes chaleurs d'été n'ont cependant pas permis aux sols et aux végétaux de manifester toutes leurs potentialités de production. Ces conditions climatiques peuvent expliquer le peu de différence observé entre les rendements des parcelles témoins et des parcelles fertilisées. Seuls les sites 3 et 5₁ semblent montrer une légère réponse à l'apport de N aux doses respectives de 70 et 80 kg N ha⁻¹.

Le climat de 1992 (planche 5.2) a été plus favorable en Alsace pour la production du maïs, avec davantage de pluies pendant la période comprise entre l'apparition des panicules mâles et la floraison femelle, laquelle correspond aussi à la période d'absorption maximale d'azote par le maïs (AGPM, 1988 ; Carlotti, 1992). De plus, le site de Meyenheim (site 9₁) a été irrigué, ces conditions ayant permis une meilleure réponse à la fertilisation azotée. Pour cette année sur les sites 8₁ et 9₁ les différences sont hautement significatives entre les témoins et les traitements fertilisés ; cependant à Obernai (site 8₁) aucune différence significative n'apparaît entre les diverses doses de fertilisation appliquées ; la réponse à l'optimum de la courbe de réponse a été atteinte à la dose X-20 (80 kg N ha⁻¹). Pour Meyenheim (site 9₁), on constate en plus une différence significative entre les différents apports d'engrais, l'optimum correspondant bien à la dose calculée (200 kg N ha⁻¹). A noter que les rendements observés sont concordants avec ceux obtenus sur d'autres sites d'Alsace par Koller (1991 et 1992).

Tableau 5.6 : rendements en maïs des essais à doses croissantes d'azote lors de deux années culturales (t M.S. ha⁻¹).

Doses N	Types de sols et sites étudiés											
	FLUVIOSOL TYPIQUE limono-sableux		RENDOSOL argillo-limoneux		NEOLUVISOL limono-argileux		PELOSOL BRUNIFIE	CALCOSOL vertique	CALCOSOL limoneux		FLUVIOSOL BRUNIFIE sablo-caillouteux	
	1) Dommarin (1992)	2) Dieulouard (1993)	3) Loisy (1992)	4) Noviant (1993)	5 ₁) Bouzule (1992)	5 ₂) Bouzule (1993)	sols très argileux		8 ₁) Obernat (1992)	8 ₂) Obernat (1993)	9 ₁) Meyenheim (1992)	9 ₂) Meyenheim (1993)
témoin 0	14,54	17,33b*	9,42	9,66	11,78	10,58c	9,89	14,08	14,81b	12,44c	12,77e	14,19b
X-90		18,95ab									16,19d	17,67a
X-80			9,19	10,32		12,37bc		15,69				
X-60	14,47	19,39ab	9,54	10,40	12,43	12,11bc	9,43	15,85	16,91a	15,74b	17,07cd	18,21a
X-30		20,35ab										
X-20	14,23		10,85	10,61	13,26	13,40ab	8,79	16,10	17,60a	16,73b	18,2bcd	18,89a
X	14,28	22,16a	9,39	10,97	13,76	14,22ab	9,42	16,73	16,63a	18,02a	20,60a	18,18a
X+20	14,58		10,51	10,38	13,01	13,90ab	8,33	16,51	18,15a	18,63a	19,10abc	19,16a
X+30		20,24ab										
X+40	14,65		9,90	11,19	14,00	14,45ab	10,47	16,64			20,16ab	19,07a
X+60	14,35	21,13a	9,04	11,31	13,03	15,78a	9,88	17,33	17,89a	18,39a		
X+80	13,90				13,14		9,05				20,96a	18,24a
X+90		21,73a										
AN. VA.	N.S.	H.S.	N.S.	N.S.	N.S.	H.S.	N.S.	N.S.	H.S.	H.S.	H.S.	H.S.
C. V. %	5,3	7,3	11,8	8,7	8,7	9,4	21,0	9,5	5,2	5,0	6,3	7,4

Doses X par site en kg N ha⁻¹ : 1)=75 ; 2)=120 ; 3)=90 ; 4), 5₁) et 5₂)=80 ; 6)=65 ; 7)=80 ; 8₁) et 8₂)=100 ; 9₁) et 9₂)=200.

* les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (test Newman-Keuls au seuil de 5%)

N.S.=Analyse de variance non significative au seuil 0,05

H.S.= Analyse de variance hautement significative au seuil de 0,01

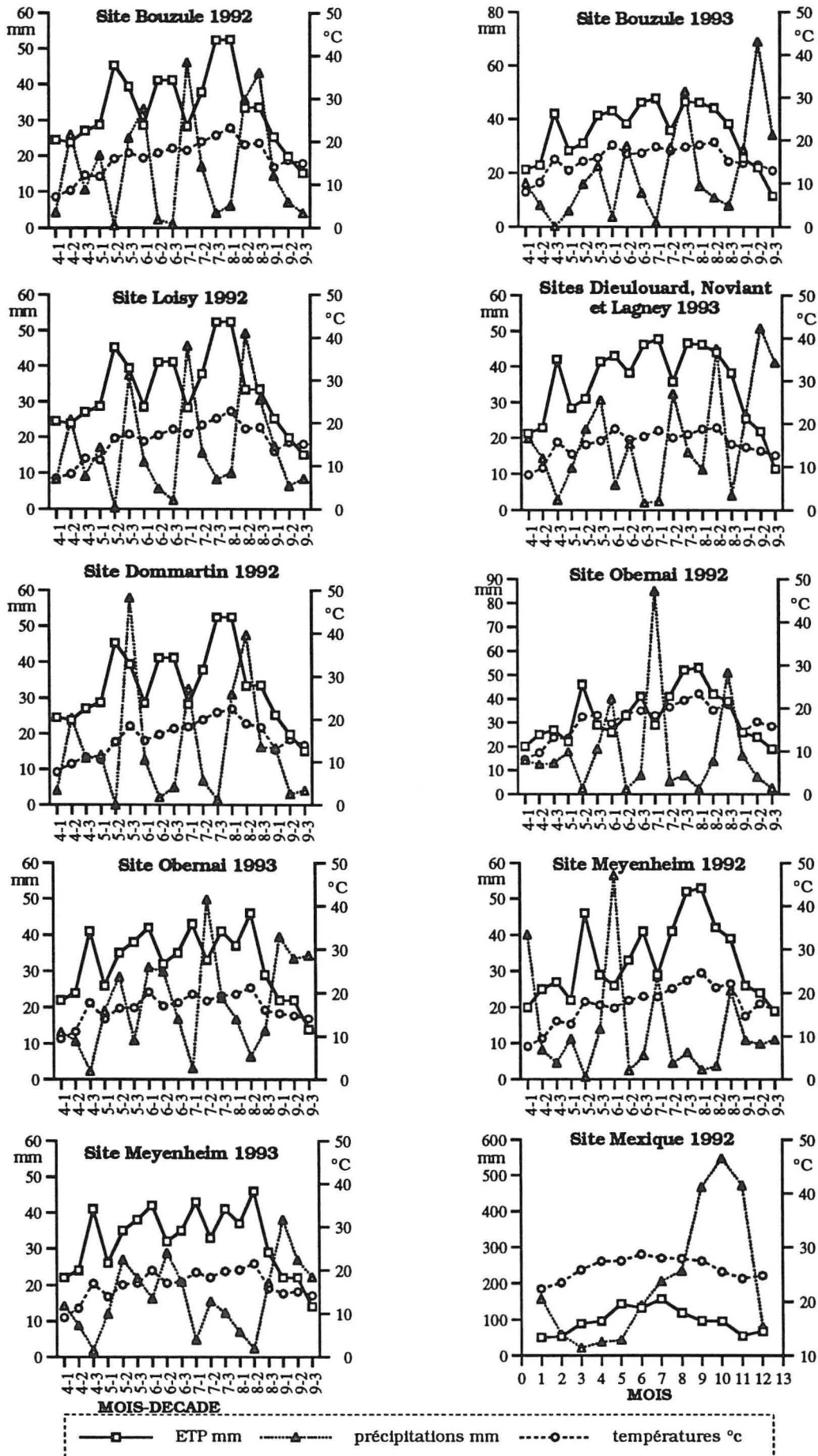


Planche 5.2 : conditions climatiques des sites étudiés les deux années

Pour l'année 1993 en Lorraine nous trouvons des réponses statistiquement significatives dans deux des quatre essais [sites Dieulouard (2) et Bouzule (5₂)] ; dans le CALCOSOL de Lagny (site 7), nous observons une bonne réponse à l'engrais azoté même si celle-ci n'est pas statistiquement significative. L'essai conduit sur le RENDOSOL de Noviant (site 4) présente seulement une légère réponse à l'engrais azoté (tableau 5.6). Pour cette année culturale nous observons une augmentation des rendements par rapport à 1992, sauf pour le RENDOSOL où les rendements sont similaires pour les deux années (sites 3 et 4).

Dans le tableau 5.7, nous présentons les rendements pour la dose à l'optimum de la courbe de réponse et les déficits climatiques des sols lorrains.

Tableau 5.7 : rendements à l'optimum de la courbe de réponse et déficits climatiques pour les sols lorrains

Sols		Sites	rendements t M.S. ha ⁻¹	déficits climatiques mm
FLUVIOSOL TYPIQUE limono-sableux		Dommartin 1992(site1)	14,23*	177
		Dieulouard 1993(site 2)	22,16	140**
RENDOSOL argilo-limoneux		Loisy 1992(site3)	10,85	181
		Noviant 1993(site4)	10,97	175
NEOLUVISOL limono-argileux		Bouzule 1992(site 5 ₁ *)	13,76	128
		Bouzule 1993(site 5 ₂)	15,78	162
PELOSOL BRUNIFIE	sols très argileux	Bouzule 1992(site 6)	9,42*	128
CALCOSOL vertique		Lagny 1993(site 7)	16,73	182

Déficit climatique calculé en fonction de la somme de ETP-P>0, pour la période encadrant la floraison femelle de $\pm 400^{\circ}\text{C}$ jours en base 6°C (CRAL-ENSAIA, 1993).

* Ces rendements correspondent au traitement ayant le CRU le plus élevé.

** Déficit climatique en tenant compte de l'eau apportée par irrigation.

Notons qu'il y a une relation inverse entre déficits climatiques et rendements pour les FLUVIOSOLS (à texture dominante sableuse) et les sols superficiels (RENDOSOLS), indiquant la sensibilité à la sécheresse de ces sols. Par contre dans les sols très argileux (PELOSOL, CALCOSOL vertique) et le NEOLUVISOL (à horizon argilo-limoneux en profondeur), cette tendance est inversée, ceci

indiquerait d'autres facteurs limitants que la sensibilité à la sécheresse dans ces sols, il faudrait donc prendre en compte d'autres éléments climatiques pouvant expliquer ces facteurs.

En Alsace nous observons des réponses statistiquement significatives pour les deux sites (8₂ et 9₂). Les différences de rendements entre les deux années sont presque nulles à Obernai, mais la réponse optimale est décalée vers des doses plus fortes par rapport à celles de 1992 (dose 120 kg N ha⁻¹ : X+20). A Meyenheim nous observons une diminution des rendements par rapport à 1992 (sauf dans le témoin) ; rappelons que les essais ont été conduits sur les mêmes parcelles expérimentales les deux années ; le rendement à l'optimum de la courbe de réponse est matérialisé par la dose X-20 avec environ 19 t M.S.ha⁻¹.

Comparons maintenant ces rendements avec les classes d'aptitude culturale des sols (tableaux 5.3 et 5.4). Pour cela considérons arbitrairement trois classes d'aptitudes culturales des sols (tableau 5.8) :

Tableau 5.8 : classes générales d'aptitude culturale des sols établies à partir des classifications techniques des sols (tableaux 5.3 et 5.4)

CLASSES D'APTITUDE	SOLS ET SITES
Sols à bonne aptitude culturale	- FLUVIOSOLS TYPIQUES de Dommartin, Dieulouard et du Mexique - CALCOSOL limoneux d'Obernai
Sols à aptitude culturale intermédiaire	- NEOLUVISOL de la Bouzule - FLUVIOSOL BRUNIFIE de Meyenheim - VERTISOL du Mexique
Sols à aptitude culturale médiocre	- CALCOSOL vertique de Lagney - RENDOSOLS de Loisy et Noviant - PELOSOL BRUNIFIE de la Bouzule

Les sols à bonne aptitude culturale sont les FLUVIOSOLS TYPIQUES de Dommartin et Dieulouard et le CALCOSOL limoneux d'Obernai ; classes II et A respectivement dans les Systèmes américain et l'approche Région Centre. Les sols à aptitude culturale

intermédiaire sont le NEOLUVISOL de la Bouzule et le FLUVIOSOL BRUNIFIE de Meyenheim ; tous deux classe III pour le premier système et respectivement classe A et B pour l'approche paramétrique. Enfin les sols à aptitude culturale médiocre sont les RENDOSOLS de Loisy et Noviant, le CALCOSOL vertique de Lagney et le PELOSOL de la Bouzule ; classés IV à VI et B à C (tableau 5.8).

D'abord notons la différence de production entre deux années consécutives, ceci fortifie notre idée de réaliser des analyses fréquentielles d'indices climatiques pour pouvoir aboutir à une bonne estimation du potentiel agricole pour chaque type de sol (cf. proposition Lorraine : chapitre III). Pour chaque année nous observons une nette concordance des classes d'aptitude des sols avec les rendements optimaux observés.

La planche 5.3 montre les rendements du témoin et du traitement à l'optimum de la courbe de réponse pour chaque site et type de sol et pour les deux années climatiques. A noter que dans le cas des essais sans réponse notable à l'apport d'azote, le traitement optimal considéré est celui correspondant au CRU le plus élevé. Les résultats des témoins et des traitements fertilisés pour chaque année correspondent bien à nos trois classes d'aptitude quand il n'y a pas d'effet irrigation, exception faite pour le cas du CALCOSOL de Lagney ; ainsi les meilleurs rendements sont observés pour les meilleurs sols et vice-versa.

Notons cependant l'influence des itinéraires techniques sur les potentialités des sols. Le FLUVIOSOL BRUNIFIE de Meyenheim classé comme sol d'aptitude intermédiaire a un comportement de sol de première classe du fait de l'irrigation et du fractionnement des doses d'engrais azoté. Le FLUVIOSOL de Dieulouard montre une nette différence positive par rapport au sol de Dommartin (pourtant assez similaire), du fait des apports d'eau occasionnels (tableaux 5.7 et 5.8).

Le cas du CALCOSOL vertique de Lagney mérite une interprétation particulière, car il montre des rendements nettement supérieurs au PELOSOL de la Bouzule, qui ne peut s'expliquer uniquement par l'effet année. Observons néanmoins que le CALCOSOL est un peu mieux classé dans les Systèmes américains et dans l'approche Région Centre de la France (tableaux 5.3 et 5.4). Ceci est du principalement à une profondeur exploitable par les racines plus importante et à la présence de carbonates dans le sol. De plus le CALCOSOL a bénéficié d'un meilleur travail du sol du fait d'un climat

en 1993 plus favorable (planche 5.2) ; en effet, les rendements obtenus en 1993 pour le PELOSOL de la Bouzule sont de 12,5 t M.S. ha⁻¹ ; l'écart entre ces deux sols pour un même année climatique n'est pas donc aussi élevé qu'il n'y paraît. Le CALCOSOL indique pour 1993 un comportement similaire aux sols de classe d'aptitude intermédiaire (le NEOLUVISOL de la Bouzule par exemple).

Comparant ces résultats à ceux obtenus sur le CALCOSOL du Barrois, à aptitude culturale similaire au PELOSOL de la Bouzule, nous notons une production agricole plus petite dans le CALCOSOL du Barrois (environ 7 t M.S. ha⁻¹ de rendement), du fait de la faible profondeur du sol, des problèmes plus difficiles d'implantation et surtout du manque de drainage artificiel (la Bouzule et le site de Lagney bénéficient d'un système de drainage souterrain). La potentialité agricole peut varier dans un certain type de sol en fonction des améliorations qu'on effectue pour réduire les facteurs limitants. Ce sont les sols les plus argileux à tendances vertiques qui présentent les plus grands problèmes d'interprétation vis-à-vis des potentialités agricoles.

Si nous comparons les rendements optimaux des sols étudiés (planche 5.3) avec les rendements mesurés sur les sols du Barrois (c.f. tableau 3.6, chapitre III), nous notons que pour des sols assez similaires : Les FLUVIOSOLS, les NEOLUVISOLS et les RENDOSOLS les rendements sont plus élevés dans le Barrois. Notons que les déficits climatiques calculés dans les différents sols sont dans la plupart des cas moins importants pour le secteur du Barrois (tableaux 3.6 et 5.7) ; en effet, une étude statistique des précipitations sur trente ans fait apparaître dans le Barrois un supplément de précipitations de l'ordre de 150 mm annuellement avec surtout une localisation entre mars et juillet. Ceci montre à nouveau la grande importance des conditions climatiques pour la détermination des potentialités agricoles à l'échelle des petites régions naturelles.

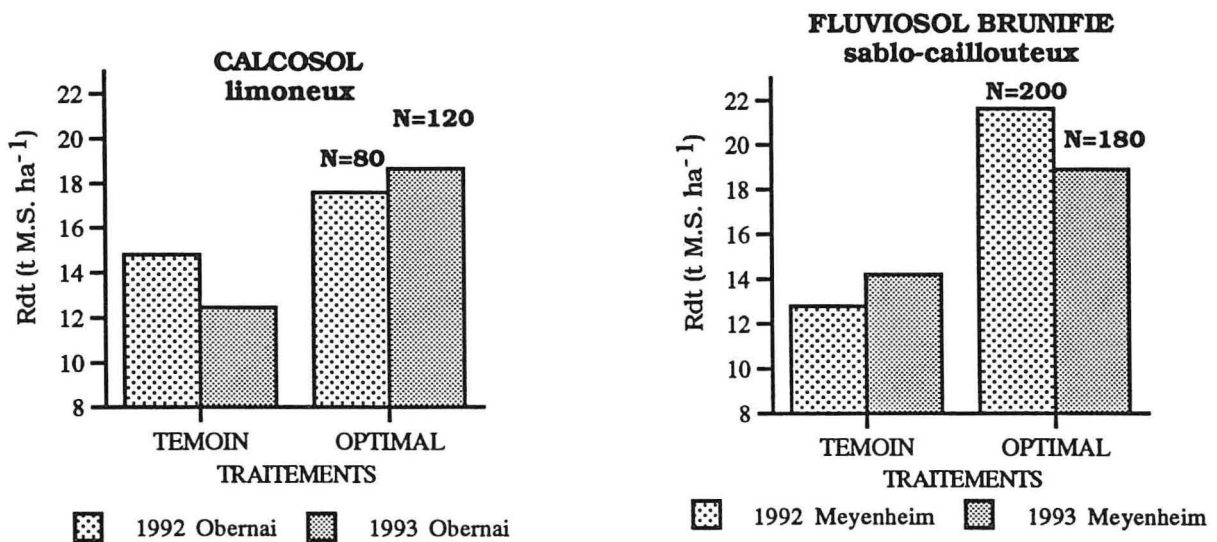
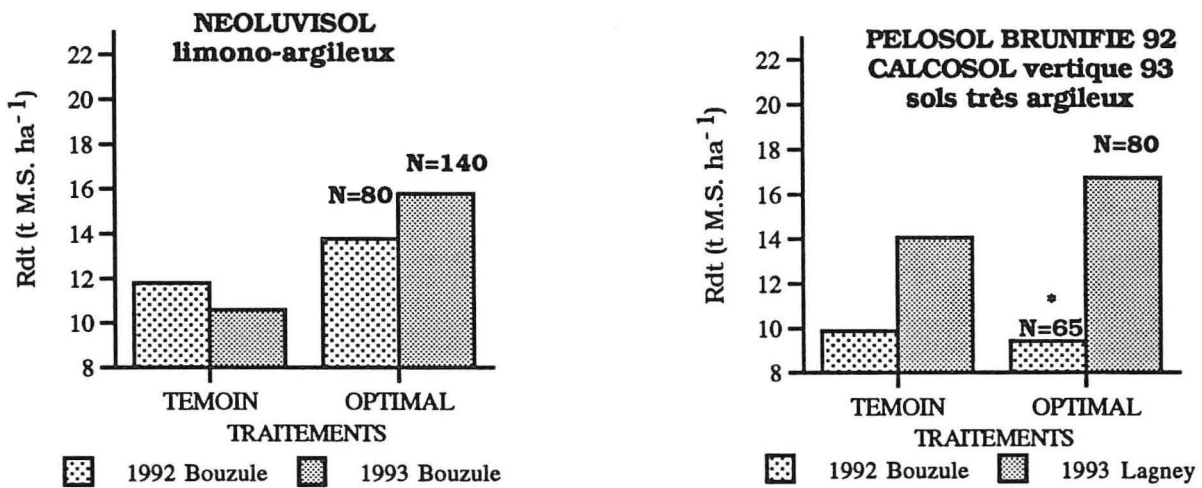
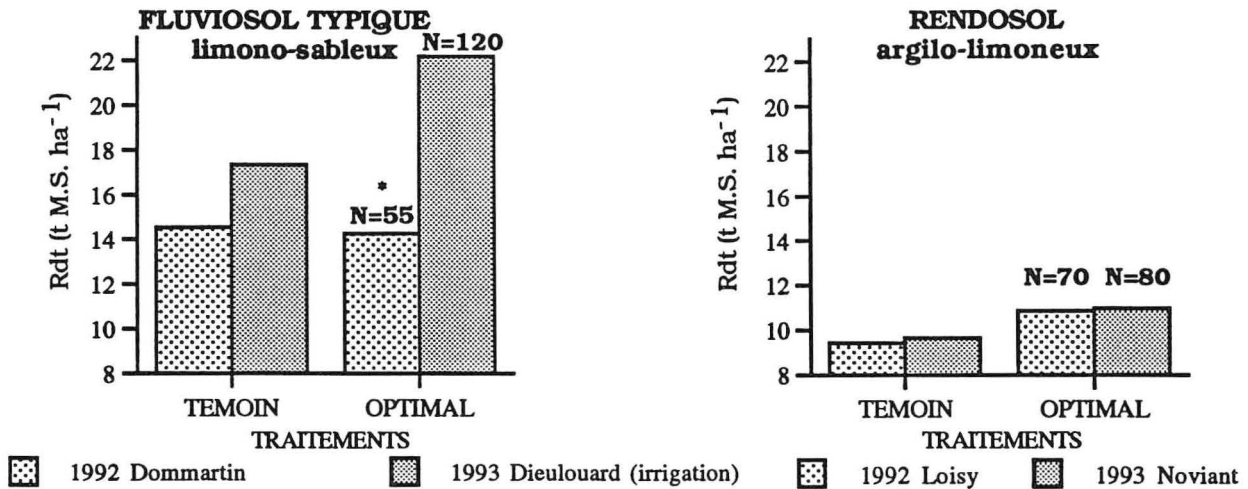


Planche 5.3 : rendements en maïs du témoin et du traitement optimal pour les différents sols

Au Mexique

Le tableau 5.9 montre les résultats obtenus dans les deux protocoles du Mexique pour les rendements en grains (à 14% d'humidité) et en matière sèche. Rappelons que l'intérêt principal de la production de maïs au Mexique est l'obtention de grains pour la consommation humaine. L'analyse de variance montre des différences hautement significatives pour les rendements en grains, avec une réponse optimale pour les deux sites à la dose X=90 kg N ha⁻¹ (préconisée dans la région). Les rendements en grains montrent cependant une productivité supérieure du VERTISOL par rapport au FLUVIOSOL ; ceci est en contradiction avec les classements de potentialités des sols réalisés (tableau 5.8). Cette différence se conserve pour les rendements en matière sèche, pour la plupart des traitements, mais la réponse optimale est obtenue à la dose X+30 (120 kg N ha⁻¹), et à cette dose le FLUVIOSOL se montre plus productif que le VERTISOL (tableau 5.9).

Tableau 5.9 : réponse du maïs aux doses d'azote dans les deux sols du Mexique pour l'année culturale 1992 (en kg ha⁻¹)

Doses N	10). VERTISOL		11). FLUVIOSOL TYPIQUE	
	Grains (14%)	M.S.(aérienne)	Grains (14%)	M.S.(aérienne)
0	2970 d*	6918 b	2490 d	6300 b
60(X-30)	4090 c	7209 b	3410 c	6547 b
90(X)	5175 a	8560 a	4613 a	8080 a
120(X+30)	4790 b	8680 a	4230 b	8957 a
ANVA	H.S.	S.	H.S.	H.S.
C.V.(%)	4,8	9,1	4,9	9,2

* Moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (test Newman-Keuls au seuil de 5%).

H.S. = Analyses de Variance hautement significatives au seuil de 0,01

S. = Analyses de Variance significatives au seuil de 0,05

Ce comportement différent par rapport aux classements des potentialités est dû principalement aux conditions climatiques de l'année 1992 (planche 5.2). En effet, la présence de faibles pluies en début de saison (juin) a permis au VERTISOL de mieux exprimer ses potentialités par rapport à sa sensibilité aux excès d'eau. Le

FLUVIOSOL, par contre, est sensible surtout aux déficits en eau, du fait de sa texture plus sableuse et de sa forte perméabilité.

Les rendements en grains obtenus sont nettement supérieurs à la moyenne nationale (2060 Kg ha⁻¹) et régionale (1700 Kg ha⁻¹) (S.A.R.H., 1991) ; ils sont proches du rendement potentiel de la variété estimé à 5 t. ha⁻¹ (INIFAP, 1991). Nous confirmons donc que par rapport au rendement en grains la dose optimale est bien 90 Kg N ha⁻¹ (Barron, 1990).

5.3.2. AZOTE PRELEVE PAR LES PARTIES AERIENNES DU MAIS A LA RECOLTE.

Du fait d'une forte variation de la biomasse racinaire et de sa teneur en Nt nous n'utiliserons pas par la suite dans nos discussions les données racinaires.

En France

Le tableau 5.10 montre les quantités d'azote prélevé par le maïs à la récolte (kg N ha⁻¹) pour les deux années culturales. Presque tous les essais montrent des différences significatives pour les traitements, sauf le PELOSOL de la Bouzule (site 6) ; ceci paraît indiquer que la plante absorbe une bonne partie de l'engrais azoté apporté.

Observons que les différences de prélèvement d'azote du maïs entre deux années consécutives sont dans les plupart des cas négligeables par rapport aux différences des rendements (planche 5.3). Seul le FLUVIOSOL de Dieulouard (1993) montre des prélèvements plus élevés pour les traitements fertilisés, par rapport au site de Dommartin (1992) ; mais ceci est dû à l'utilisation de l'irrigation.

La planche 5.4 établit une comparaison entre les quantités d'azote prélevé par le maïs pour le traitement témoin et le traitement fertilisé à l'optimum statistique (basé sur le test de groupes homogènes Newman Keuls, sauf pour le PELOSOL où nous avons pris le traitement avec le prélèvement le plus important). Comparons ceci avec les classes d'aptitude mentionnées auparavant (tableau 5.8). On constate une liaison assez étroite entre les

prélèvements d'azote et les potentialités culturales des sols ; ceci est aussi valable pour le témoin sans azote, sauf dans le cas du NEOLUVISOL lequel montre des prélèvements faibles du témoin similaires à ceux du PELOSOL ; ceci peut être lié au passé cultural de la parcelle qui était en monoculture de maïs depuis au moins cinq ans. Notons aussi le grand écart entre les prélèvements du témoin zéro pour les deux RENDOSOLS et les deux FLUVIOSOLS de Lorraine ; pour les FLUVIOSOLS cette différence s'explique par les apports de fumier uniquement à Dommartin ; pour les RENDOSOLS cette différence pourrait être liée à une profondeur de sol un peu moins importante à Noviant. Rappelons que l'azote prélevé par le témoin non fertilisé (No) est fréquemment utilisé dans le Nord-Est de la France pour estimer les fournitures azotées des sols ; il a été intégré dans la formule du bilan simplifiée (Koller, 1991 ; Desvignes, 1992 ; Delphin, 1993 ; Limaux, 1994).

Pour les sols alsaciens rappelons que nous assistons en 1993 à des témoins double zéro ; ceci est bien reflété par le sol d'Obernai qui montre des prélèvements nettement moins importants pour 1993 dans le témoin ; cependant pour le sol de Meyenheim la tendance est inversée ; il pourrait s'agir en 1993 d'une erreur de manipulation lors de la mesure de rendement du témoin double zéro.

La différence de réponse en rendements et en prélèvements d'azote de la plante, montrent une certaine tendance du maïs à l'absorption de l'azote même si ceci ne se traduit pas par une augmentation de rendement en M.S. L'influence de cet enrichissement en azote sur la qualité des fourrages doit être prise en compte économiquement dans les systèmes de polyculture-élevage, sans négliger l'impact écologique des apports d'azote.

Tableau 5.10 : quantités d'azote prélevé par le maïs à la récolte lors de deux années culturales (kg N ha⁻¹).

Doses N	Types de sols et sites étudiés													
	FLUVIOSOL TYPIQUE limono-sableux		RENDOSOL argilo-limoneux		NEOLUVISOL limono-argileux		PELOSOL BRUNIFIE	CALCOSOL vertique	CALCOSOL limoneux		FLUVIOSOL BRUNIFIE sablo-caillouteux			
	1) Dommartin (1992)	2) Dieulouard (1993)	3) Loisy (1992)	4) Novlant (1993)	5 ₁) Bouzule (1992)	5 ₂) Bouzule (1993)	sols très argileux		6) Bouzule (1992)	7) Lagny (1993)	8 ₁) Obernat (1992)	8 ₂) Obernat (1993)	9 ₁) Meyenheim (1992)	9 ₂) Meyenheim (1993)
témoin 0	166b*	142c	112a	83c	102c	94c			98	115b	145b	110e	122e	162c
X-90		156c											186d	209b
X-80														
X-60		176b	114a	96c		114c				159a				
X-40	164b		133a	116b	119c	117c			95	160a	182a	145d	195d	231ab
X-30		208a												
X-20	177ab		152a	129ab	143b	147b			102	147a	189a	161c	236c	243a
X	179ab	234a	126a	127ab	154ab	151ab			109	167a	184a	198b	271ab	234ab
X+20	183ab		145a	132ab	140b	161ab			109	170a	209a	197b	237c	247a
X+30		219a												
X+40	197a		149a	140ab	165ab	169ab			138	164a			261bc	249a
X+60	192a	229a	138a	145a	165ab	177a			115	173a	215a	215a		
X+80	191a				179a				116				289a	234ab
X+90		228a												
AN. VA.	H.S.	H.S.	S.	H.S.	H.S.	H.S.	N.S.		H.S.	H.S.	H.S.	H.S.	H.S.	H.S.
C. V. %	5,6	6,8	12,5	9,2	8,6	9,9	21,8		9,4	8,7	5,2	6,7	5,7	

Doses X par site en kg N ha⁻¹ : 1)=75 ; 2)=120 ; 3)=90 ; 4), 5₁) et 5₂)=80 ; 6)=65 ; 7)=80 ; 8₁) et 8₂)=100 ; 9₁) et 9₂)=200.

* les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (test Newman-Keuls au seuil de 5%)

N.S.=Analyse de variance non significative au seuil 0,05

S. = Analyse de variance significative au seuil 0,05

H.S.= Analyse de variance hautement significative au seuil de 0,01

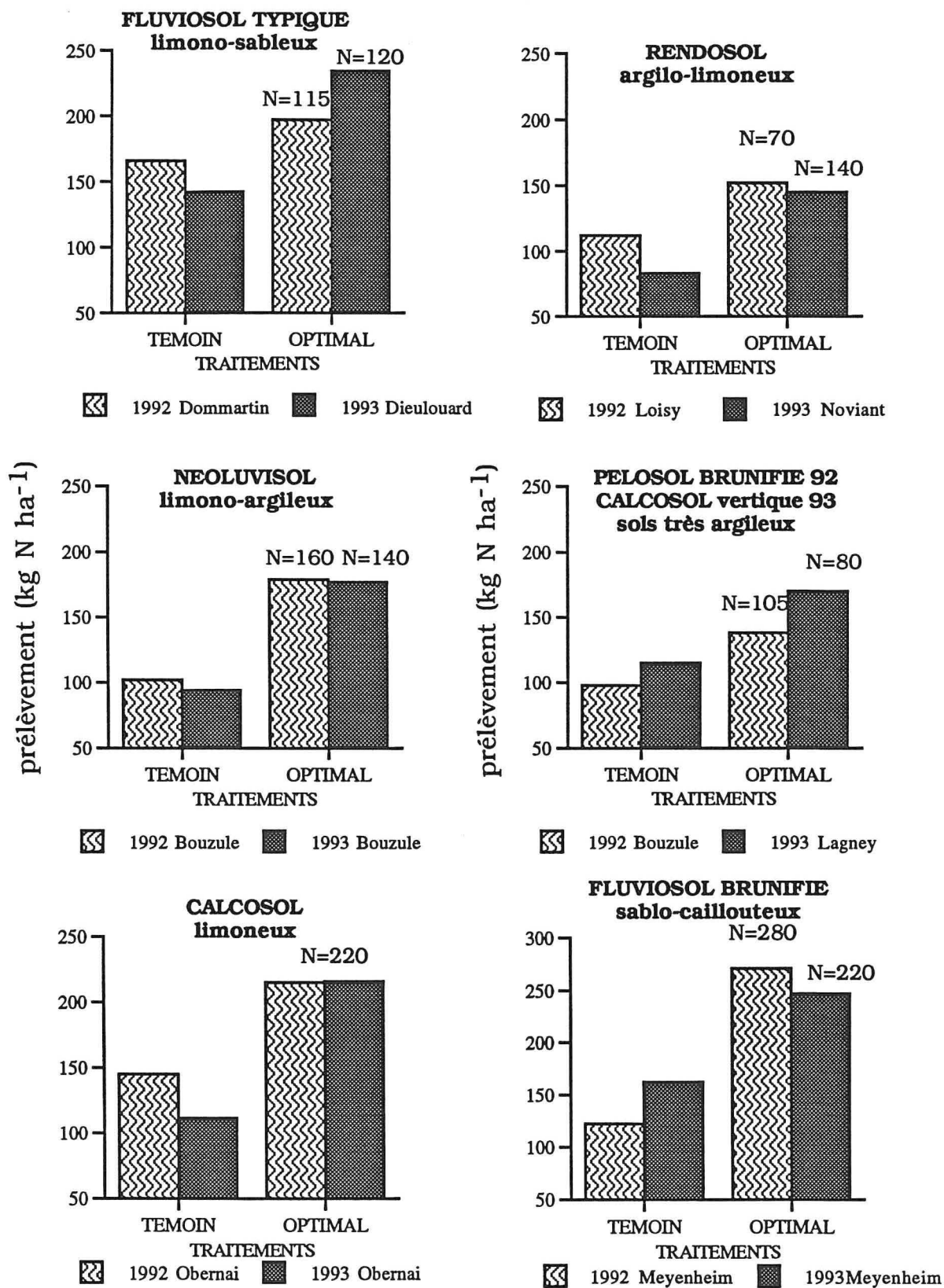


Planche 5.4 : comparaison des prélèvements azotés du maïs pour les doses témoins et optimales sur les sols du Nord-Est de la France

Au Mexique

Dans les expériences du Mexique nous trouvons des différences hautement significatives pour l'azote prélevé à la récolte par le maïs (tableau 5.11). Les doses de 90 et 120 Kg N ha⁻¹ sont groupées dans le même ensemble pour le test des moyennes. Pour le VERTISOL les résultats montrent un meilleur prélèvement d'azote par la plante lié à des meilleurs rendements. A la différence des essais français les essais tropicaux ne montrent pas une correspondance avec les classes d'aptitude culturale (tableau 5.8) ; les explications ont été données au moment de discuter les rendements. Notons le grand écart qui existe entre le traitement 0 azote et les traitements fertilisés ; ceci met en évidence la faible contribution des fournitures azotées du sol à la nutrition du maïs.

Tableau 5.11 : variation de l'azote prélevé par le maïs dans les deux sols mexicains en 1992 (données en Kg N ha⁻¹)

Doses N	10). VERTISOL	11). FLUVIOSOL TYPIQUE
0	51.2 c*	45.4 c
60(X-30)	92.2 b	88.0 b
90(X)	130.6 a	116.5 a
120(X+30)	136.6 a	117.2 a
ANVA	H.S. (1%)	H.S. (1%)
C.V. (1%)	6.9	12.2

* moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (test Newman-Keuls au seuil de 5%)

H.S.= Analyse de variance hautement significative au seuil de 0,01

5.3.3. COEFFICIENT APPARENT D'UTILISATION DE L'ENGRAIS AZOTE (CAU)

Le CAU est le rapport du supplément d'éléments fertilisants (azote dans notre cas) prélevé entre une culture fertilisée et la même culture non fertilisée, à la quantité apportée de cet élément fertilisant (Comifer, 1993). Cette façon de calculer l'efficacité de l'engrais azoté est basée sur la méthode de la différence de

prélèvements par rapport au témoin (Hauck et Bremner, 1976). Son calcul dans le cas de l'azote est établi d'après la formule suivante :

$$\text{CAU}\% = \frac{N_x - N_0}{X} \times 100$$

Avec : N_x = Quantité d'azote prélevé par la culture à la dose X.

N_0 = Quantité d'azote prélevé par la culture à la dose nulle (témoin 0)

X = dose d'apport d'engrais azoté.

Dans notre travail nous considérons seulement l'azote prélevé par les parties aériennes du maïs en raison de la variation constatée pour les données racinaires. D'après la bibliographie il est possible de majorer de 10% les valeurs des parties aériennes pour prendre en compte les racines (Carlotti, 1992) ; néanmoins, nous avons préféré maintenir les résultats analytiques acquis sur les parties aériennes.

En France

Le tableau 5.12 montre les CAU calculés à partir des données d'azote prélevé par le maïs à la récolte (tableau 5.10). Une première constatation est l'extraordinaire variation des valeurs de CAU par rapport aux doses d'azote engrais apporté, aux types de sols et aux années climatiques (fig 5.1).

Notons aussi qu'il y a deux essais de l'année 1992, où nous n'avons pas eu de réponse à la fertilisation azotée (site 1 de Dommartin et site 6 de la Bouzule), du fait de l'année climatique plus limitante (planche 5.2) et des apports de fumier en début de rotation ; ceci a conduit à des prélèvements en azote des traitements fertilisés négligeables par rapport au témoin sans azote et donc à des CAU très petits (voire négatifs : tableau 5.12). Rappelons aussi que pour les essais alsaciens de 1993 nous ne pouvons pas nous permettre de calculer les CAU du fait de la présence de témoins double zéro. Dans la discussion des résultats de CAU, nous ne prendrons pas en compte ces quatre essais. Il y a eu aussi des essais sans réponse statistique à l'azote au niveau rendements, mais qui ont montré des prélèvements en azote correspondant aux doses d'engrais apporté ; ceci a permis d'obtenir pour certains traitements

des CAU conformes a ceux mentionnés par Carlotti (1992) pour les sols français soit entre 60 et 80% (la majoration de 10% pour tenir compte des racines est intégrée dans ces chiffres), pour des apports respectifs au semis et au stade 8 feuilles.

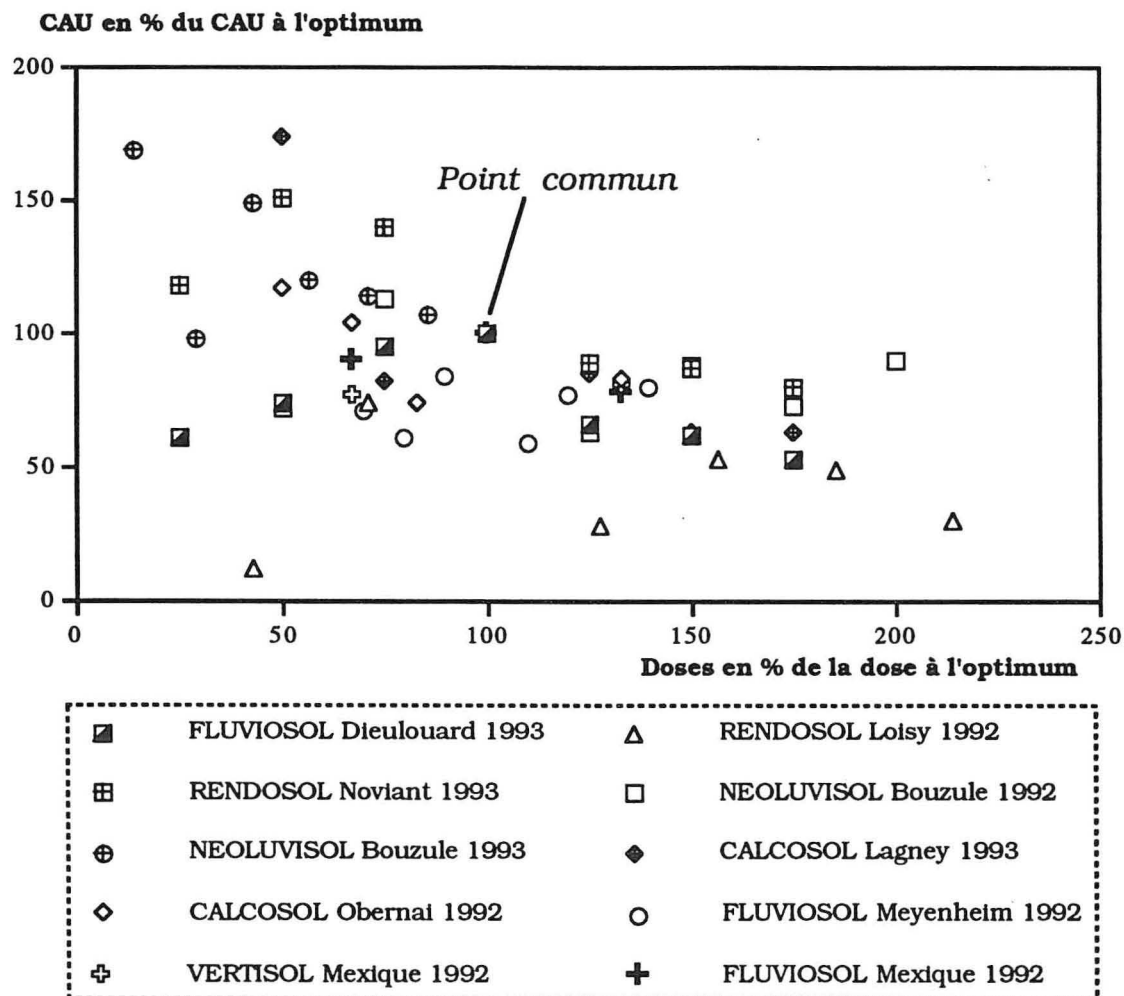


Fig. 5.1 : comparaison des CAU et Doses d'azote en % des valeurs à l'optimum de la courbe de réponse

Limaux (1994) utilisant uniquement les résultats obtenus sur les sols lorrains constate des CAU très variables et conclut qu'il n'apparaît pas un effet net des doses et des années climatiques ; en revanche, il lui semble se dégager un effet type de sol.

En effet, utilisant seulement les CAU obtenus à l'optimum de la courbe de réponse pour les sols lorrains, les sols à meilleure aptitude culturale présentent les CAU les plus élevés (site Dieulouard avec CAU de 77% à la dose 120 kg N ha⁻¹). Les sols à aptitude

intermédiaire montrent des CAU intermédiaires : sites Bouzule 5₁ et 5₂ et site Lagney 7 avec des CAU compris entre 59 et 65% pour les doses respectives de 80, 140 et 80 kg N ha⁻¹. Enfin les RENDOSOLS dont les aptitudes culturales sont médiocres présentent des CAU de 55 et 57% respectivement pour les doses de 80 et 70 kg N ha⁻¹ de Noviant et Loisy (tableau 5.12 ; fig 5.2).

Ces résultats doivent être nuancés du fait de l'utilisation de l'irrigation et du manque d'apport de fumier sur le site de Dieulouard 93 ; ceci a permis une meilleure utilisation de l'azote engrais par le maïs et explique des CAU très élevés.

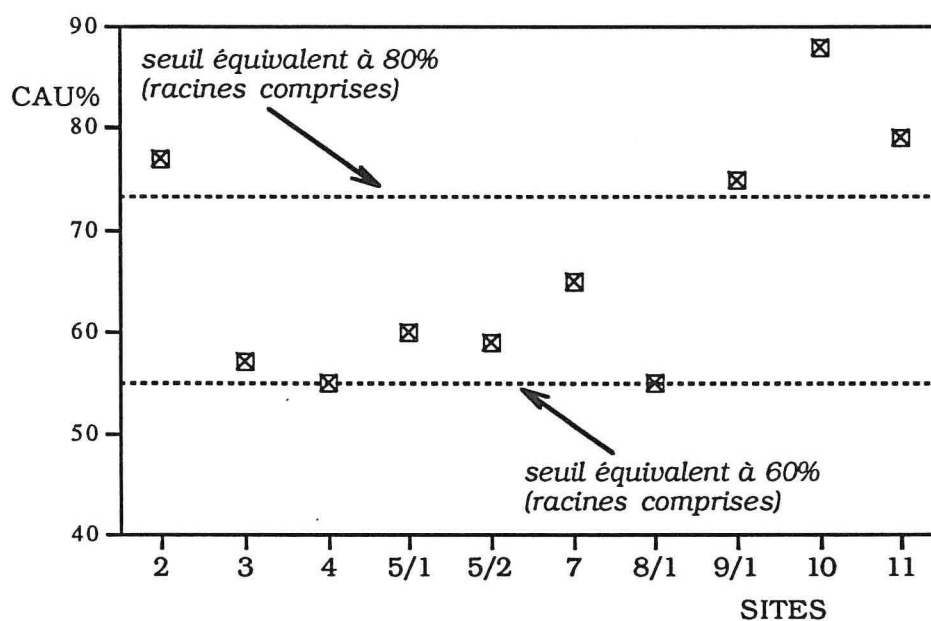


Fig 5.2 CAU à l'optimum de la courbe de réponse

Dans le cas des sols alsaciens, nous retrouvons la même variabilité des CAU (figure 5.1), et les effets types de sols ne sont pas évidents (fig 5.2), sans doute du fait de l'utilisation d'itinéraires techniques plus performants à Meyenheim (irrigation et fractionnement des apports d'engrais azoté) ; pour ce dernier site les CAU à l'optimum de la courbe de réponse sont très importants et similaires à ceux d'un sol à très bonne aptitude. Pour le CALCOSOL d'Obernai nous observons de faibles valeurs de CAU par rapport à sa potentialité, soit un CAU à l'optimum de 55% à peine situé sur le seuil de 60% (racines comprises) mentionné par Carlotti (1992). Nous ne trouvons pas d'explication à cette valeur mais ceci avait été observé auparavant sur des sols similaires par Koller (1991) ; nous

Tableau 5.12 : coefficient Apparent d'Utilisation (CAU %) de l'engrais azoté sous culture de maïs lors de deux années culturales.

Doses N	Types de sols et sites étudiés													
	FLUVIOSOL TYPIQUE limono-sableux		RENDOSOL argilo-limoneux		NEOLUVISOL limono-argileux		PELOSOL BRUNIFIE	CALCOSOL vertique	CALCOSOL limoneux		FLUVIOSOL BRUNIFIE sablo-caillouteux			
	1) Dommartin (1992)	2) Dieulouard (1993)	3) Lohy (1992)	4) Noviant (1993)	5 ₁) Bouzule (1992)	5 ₂) Bouzule (1993)	sols très argileux		6) Bouzule (1992)	7) Lagney (1993)	8 ₁) Obernat (1992)	8 ₂) Obernat (1993)	9 ₁) Meyenheim (1992)	9 ₂) Meyenheim (1993)
X-90		47												
X-80													53	-
X-60		57	7	65		100			220					
X-40	-6		42	83	43	58		-12	113	62	-		46	-
X-30		73												
X-20	20		57	77	68	88		9	53	55	-		63	-
X	17	77	16	55	60	71		17	65	39	-		75	-
X+20	18		30	49	38	67		13	55	53	-		44	-
X+30		51												
X+40	27		28	48	53	63		38	41				58	-
X+60	19	48	17	44	44	59		14	41	44	-			
X+80	16				54			12					60	-
X+90		41												

Doses X par site en kg N ha⁻¹ : 1)=75 ; 2)=120 ; 3)=90 ; 4), 5₁) et 5₂)=80 ; 6)=65 ; 7)=80 ; 8₁) et 8₂)=100 ; 9₁) et 9₂)=200.

pensons que l'organisation de l'azote engrais dans ces sols profonds et calcaires doit jouer un rôle important pour réduire les coefficients d'efficacité de l'engrais azoté.

Par rapport aux doses d'engrais azoté la principale variabilité est rencontrée pour les doses en-dessous de la dose à l'optimum de la courbe de réponse (doses suboptimales). En effet, à ces doses faibles nous trouvons des CAU qui peuvent se situer soit en-dessous, soit au-dessus du CAU à l'optimum. Cependant, pour les doses plus élevées que la dose optimale (doses supraoptimales), les CAU montrent une nette décroissance par rapport à la valeur atteinte à la dose optimale (fig 5.1). Pour essayer de comprendre la variation des CAU par rapport à la dose nous avons séparé des ensembles de sols montrant des comportements similaires (planche 5.5).

Dans un premier cas de figure **(a)** le CAU apparaît comme indépendant de la dose d'azote ; cet ensemble est concordant avec le comportement du CRU comme nous le verrons plus tard et il est constitué par seulement trois essais de 1992 : le NEOLUVISOL de la Bouzule, le CALCOSOL d'Obernai et le FLUVIOSOL de Meyenheim, tous les trois ayant eu les meilleures réponses à l'azote engrais pour cette année climatique.

Le deuxième cas de figure **(b)** est constitué par un ensemble où nous constatons des CAU plus élevés que le CAU à la dose optimale, pour les faibles doses ; ces CAU décroissent sensiblement avec l'augmentation de la dose ; cet ensemble regroupe trois des quatre sols lorrains de l'année 1993 ; notons qu'il manque seulement le sol de Dieulouard ayant reçu des apports d'eau. Cette tendance avait été constatée par Limaux (1994), pour différents sols lorrains sous culture de blé.

Finalement le cas de figure **(c)**, regroupe l'ensemble des sols montrant des CAU, aux doses suboptimales, inférieurs au CAU à la dose optimale, et qui augmentent avec la dose jusqu'à cette dose optimale pour décroître sensiblement ensuite. Cet ensemble est constitué par : le RENDOSOL de Loisy, le FLUVIOSOL de Dieulouard, et les deux sols mexicains.

Il semble y avoir un effet année des techniques d'irrigation, des apports de fumier et de réponse à l'azote, dans le comportement du CAU par rapport aux doses d'engrais ; cependant il faut disposer de résultats plus nombreux avec des années climatiques différentes pour pouvoir conclure plus rigoureusement.

Au Mexique

Les Coefficients Apparents d'Utilisation de l'engrais azoté des sols mexicains apparaissent dans le tableau 5.13. Nous trouvons ici des valeurs générales supérieures à celles indiquées par Carlotti (1992) d'autant plus que cet auteur tient compte du CAU de la plante entière. Notons cependant que les apports de fertilisants ont été fractionnés stade 2-3 feuilles et stade 7-8 feuilles et localisés dans la bande des lignes de semis.

Signalons que Ganry (1990), trouve des valeurs moyennes de 74% pour des applications en bandes pour un sol ferrugineux tropical du Sénégal.

Dans le cas des sols mexicains pour l'année considérée nous observons qu'il existe une tendance en fonction des doses d'engrais apporté ; ainsi le CAU augmente avec la dose d'azote jusqu'à un certain seuil, en l'occurrence l'optimum de la courbe de réponse pour les rendements de maïs grain (dose X, soit 90 kg N ha⁻¹). Pour les deux sols au-delà de cette dose les CAU diminuent, montrant l'inefficacité de dépasser cette dose optimale (planche 5.5, comportement (c)).

Comparant les CAU à l'optimum de la courbe de réponse (dose 90 kg N ha⁻¹) et les classes d'aptitude culturale des sols, nous observons à nouveau la même situation que pour les rendements ; le sol à meilleure aptitude (FLUVIOSOL) montre les CAU les plus petits.

Tableau 5.13 : Coefficient Apparent d'Utilisation de l'engrais azoté (%) dans les sols mexicains cultivés en maïs (année 1992).

Doses N kg ha ⁻¹	10).-VERTISOL	11).-FLUVIOSOL TYPIQUE
60 (X-30)	68	71
90 (X)	88	79
120 (X+20)	71	62

CAU en % du CAU à l'optimum

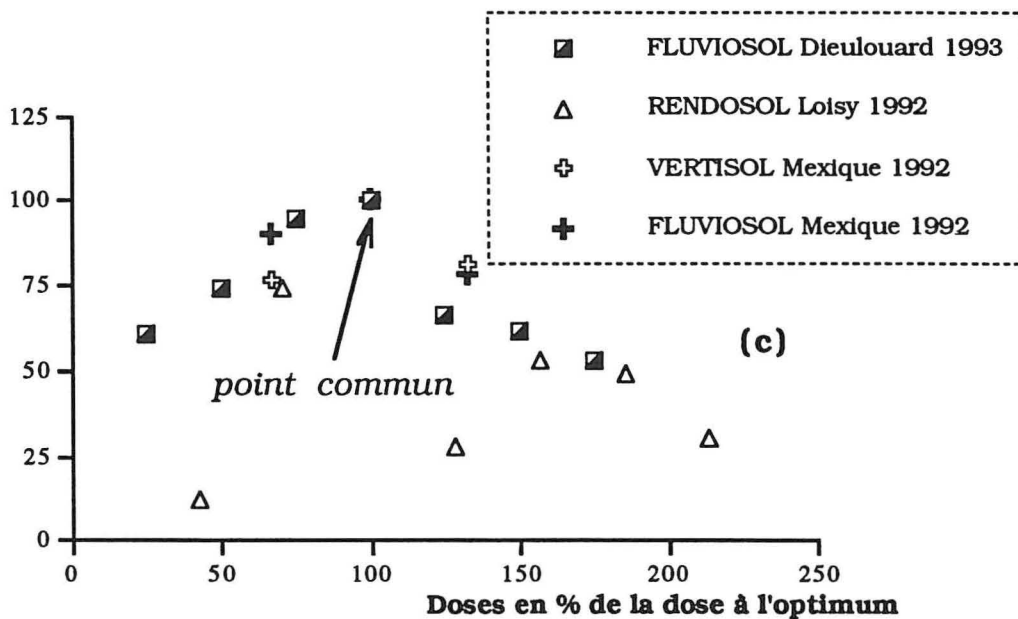
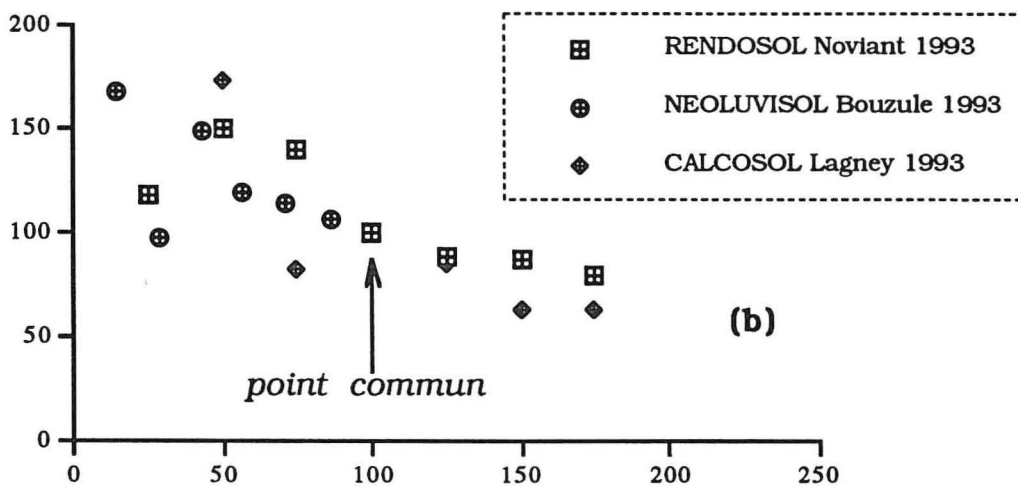
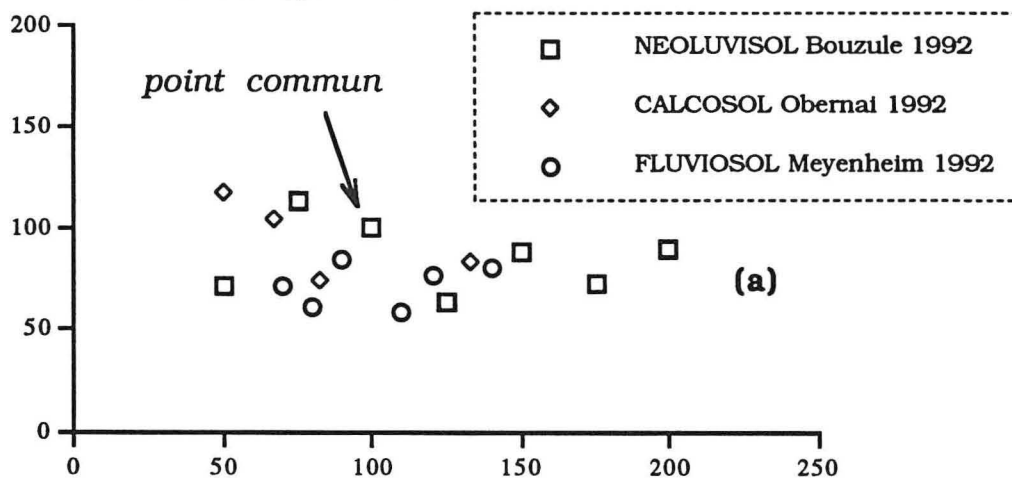


Planche 5.5 : comparaison des CAU et Doses d'azote en % des valeurs à l'optimum de la courbe de réponse pour les sols français

5.3.4. COEFFICIENT REEL D'UTILISATION DE L'ENGRAIS AZOTE (CRU)

Le coefficient réel d'utilisation d'un engrais azoté (CRU) est la fraction de l'azote de l'engrais absorbée par la culture ; il est exprimé en % de l'azote apporté sous forme d'engrais (Comifer, 1993). Pour calculer le CRU il faut utiliser des techniques isotopiques (Hauck et Bremner, 1976 ; Guiraud, 1984). Il est calculé par la formule suivante :

$$\text{CRU}\% = \frac{N_x \times E}{X \times E_o} \times 100$$

Avec : N_x = Quantité d'azote prélevé par la culture à la dose X .

X = dose d'apport d'engrais azoté.

E = excès isotopique de ^{15}N de la culture en %.

E_o = excès isotopique de ^{15}N de l'engrais apporté en %.

Dans le cadre de notre travail nous avons retenu comme N_x l'azote prélevé par les parties aériennes du maïs au moment de la récolte, car les racines ont montré des données très variables en M.S. et teneurs en N total et ^{15}N ; nous avons donc choisi de ne pas intégrer cette variable dans les calculs.

En France

Le tableau 5.14 montre les CRU obtenus pour l'ensemble des sols français. Il faut préciser que dans le cas des sols lorrains lors de la deuxième année de travail nous avons élargi la fourchette d'exploration avec l'azote marqué, en utilisant des doses extrêmes par rapport à la dose X . Dans l'interprétation des résultats nous laissons pour l'instant de côté le traitement où le fertilisant a été apporté au stade 7-8 feuilles.

Remarquons qu'à l'exception des sites 1, 52 et 7 nous avons obtenu le CRU le plus élevé, à la dose X (calculé par la méthode du bilan simplifiée).

Notons qu'à la différence des CAU, les CRU restent très

Tableau 5.14: Coefficient Réel d'Utilisation (CRU %) de l'engrais azoté sous culture de maïs lors de deux années culturales.

		Types de sols et sites étudiés												
Doses	N	FLUVIOSOL TYPIQUE limono-sableux		RENDOSOL argilo-limoneux		NEOLUVISOL limono-argileux		PELOSOL BRUNIFIE	CALCOSOL vertique	CALCOSOL limoneux		FLUVIOSOL BRUNIFIE sabio-caillouteux**		
		1) Dommartin (1992)	2) Dleulouard (1993)	3) Loisy (1992)	4) Noviant (1993)	5 ₁) Bouzule (1992)	5 ₂) Bouzule (1993)	sols très argileux		6) Bouzule (1992)	7) Lagney (1993)	8 ₁) Obernal (1992)	8 ₂) Obernal (1993)	9 ₁) Meyenheim (1992)
X-90			54±8											
X-60					39±7		66±16		43±8					
X-20		48±7		44±7		41±1		17±1		43±2	34±1		48±2	49±2
X		41±9	54±9	53±4	39±2	45±9	42±5	27±5	27±4	40±4			54±2	
X*		44±6	57±3	55±8	33±3	49±14	55±10	30±6	39±8					
X+20		49±0,5		48±7		41±3		19±11		43±2	39±2		52±3	42±5
X+60					39±0,4		48±9		31±2					
X+90			48±2											

Doses X par site en kg N ha⁻¹ : 1)=75 ; 2)=120 ; 3)=90 ; 4), 5₁) et 5₂)=80 ; 6)=65 ; 7)=80 ; 8₁) et 8₂)=100 ; 9₁) et 9₂)=200.

* Dose N apportée au stade 7-8 feuilles

** Apport fractionné de l'azote engrais

homogènes par rapport aux doses d'azote engrais ; en effet, le test de "t" de Student appliquées au moyennes (tableau 5.15), entre les doses X et X±20, X±60 ou X±90 donne généralement des valeurs non significatives au seuil 0,10%. Observons quelques exceptions : le PELOSOL montre des différences hautement significatives tout en présentant les CRU les plus petits ; le CALCOSOL d'Obernai présente des différences significatives mais avec des valeurs de CRU très proches (écarts types petits). Par contre le NEOLUVISOL de la Bouzule (site 52) et le CALCOSOL de Lagny (site 7), montrent des valeurs de CRU éloignées par rapport aux valeurs de la dose X, mais les écarts types sont très importants et les différences sont donc non significatives. En général les sols lorrains présentent des écarts types importants par rapport aux sols alsaciens vraisemblablement du fait de l'apport de fumiers.

Tableau 5.15 : comparaison des moyennes ("t" de Student) entre les CRU obtenus à doses différentes

Sites	Années	Couples de doses comparées									
		X-90/ X	X-60/ X	X-30/ X	X-20/ X	X/ X(8-f.)	X-20/ X+20	X/ X+20	X/ X+30	X/ X+60	X/ X+90
1	1992				N.S.	N.S.		N.S.			
2	1993	N.S.				N.S.					N.S.
3	1992				S.	N.S.		N.S.			
4	1993		N.S.			S.				N.S.	
5 ₁	1992				N.S.	N.S.		N.S.			
5 ₂	1993		S.			N.S.				N.S.	
6	1992				H.S.	N.S.		S.			
7	1993		N.S.			N.S.				N.S.	
8 ₁	1992				S.			N.S.			
8 ₂	1993						H.S.				
9 ₁	1992				S.			N.S.			
9 ₂	1993						N.S.				
10	1992			N.S.					N.S.		
11	1992			N.S.					N.S.		

Doses X par site en kg N ha⁻¹ : 1)=75 ; 2)=120 ; 3)=90 ; 4), 5₁) et 5₂)=80 ; 6)=65 ; 7)=80 ; 8₁) et 8₂)=100 ; 9₁) et 9₂)=200 ; 10) et 11)=90.

H.S. = différences hautement significatives au seuil de 0,01

S.= différences significatives au seuil de 0,05

N.S. = différences non significatives au seuil de 0,05

Remarquons que pour la deuxième année en Lorraine (1993), où nous avons testé des doses plus différenciées, cette tendance de manque d'effet des doses sur le CRU est maintenue. Ces résultats confirment ceux obtenus par d'autres auteurs ayant constaté l'indépendance du CRU par rapport aux doses d'engrais azoté (Machet *et al*, 1987 ; Recous, 1983 et 1988 ; Destain *et al*, 1991 ; Plas, 1992 ; Limaux, 1994).

Bien que n'ayant pas obtenu de différences statistiques de la réponse à l'engrais dans 5 de nos 12 sites, nous trouvons des CRU comparables aux valeurs signalées dans la bibliographie ; Carlotti (1992) mentionne pour les plantes entières des valeurs de CRU comprises entre 40 et 60% pour des apports au semis et entre 60 et 80% pour des apports plus tardifs.

De plus les CRU à l'optimum de la courbe de réponse sont en accord dans un grand nombre de cas avec la classification d'aptitude culturale de nos sols (tableau 5.8 ; fig 5.3). D'après nos résultats nous pouvons différencier trois tendances différentes à l'optimum de la courbe de réponse :

- les sols ayant des CRU pour les parties aériennes égaux ou supérieurs à 45%, (FLUVIOSOLS de Dommartin, de Dieulouard et de Meyenheim et NEOLUVISOL de la Bouzule) ;

- les sols ayant des CRU compris entre 36 et 45% (CALCOSOLS d'Obernai, RENDOSOLS de Loisy et de Noviant) ;

- finalement les sols présentant des CRU inférieurs à 36%, (PELOSOL de la Bouzule et CALCOSOL verticale de Lagny).

Pour le premier ensemble ce comportement se rattache davantage aux classes de sols à aptitude culturale bonne ou intermédiaire ; notons en outre que les FLUVIOSOLS de Meyenheim et de Dieulouard ont bénéficié d'un itinéraire technique performant (irrigation et fractionnement de l'apport d'engrais pour Meyenheim et seulement irrigation pour Dieulouard) ; ce qui a permis sur ces parcelles d'obtenir les CRU les plus élevés. Pour le sol de Meyenheim, Koller (1992) avait trouvé des CRU de l'ordre de 55% pour les plantes entières.

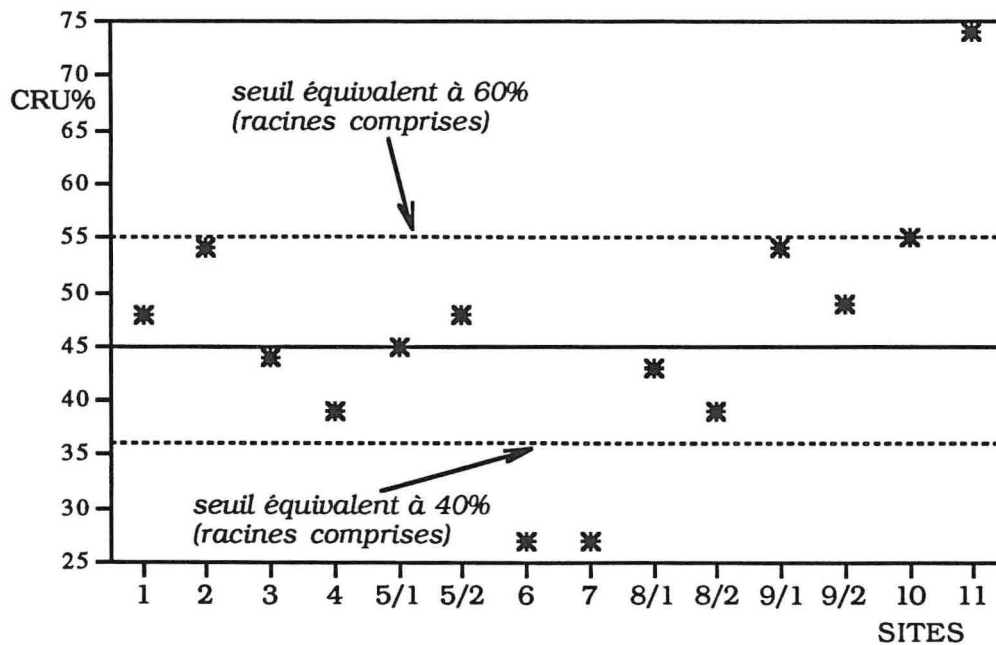


Fig 5.3 : CRU(%) à l'optimum de la courbe de réponse pour tous les sites

Nos résultats confirment ceux de Ruselle *et al.* (1981) signalant qu'une irrigation légère et un fractionnement de la dose de N augmentent l'efficacité du fertilisant. Par contre Olson (1980) n'observe aucune influence de l'irrigation sur l'efficacité de la fertilisation azotée quand celle-ci est appliquée en un seul apport.

Dans le deuxième ensemble le comportement des sols est un peu plus complexe ; en effet le CALCOSOL d'Obernai classé comme un sol à bonne potentialité manifeste des CRU inférieurs ou égaux à 43% malgré les bons rendements observés (tableau 5.5) ; les CRU obtenus se trouvent cependant dans la fourchette donnée par Carlotti (1992), mais ils ne correspondent pas à la potentialité agricole de ces sols ; nous ne pouvons ici expliquer cette efficacité de l'azote engrais dans ce sol, mais l'hypothèse d'une organisation très importante dans les sols calcaires sera discutée dans le chapitre VI. Par ailleurs les RENDOSOLS de Loisy et de Noviant se trouvent placés dans la classe des sols médiocres (tableau 5.8), confirmé par de faibles rendements (tableau 5.6) ; ces sols montrent cependant des CRU respectivement de 44 et 39% (tableau 5.14, fig 5.3), et équivalents à ceux mesurés dans le CALCOSOL d'Obernai. Ces valeurs de CRU un peu élevées par rapport aux potentialités de ces sols

peuvent être attribuées au bon état structural (Chéloufi, 1991) et à une concentration importante de l'azote engrais dans la solution du sol du fait des faibles volumes de terre exploitables par les racines (Machet *et al.*, 1987 ; Recous, 1988).

Pour le troisième ensemble nous trouvons les CRU les plus faibles dans le PELOSOL de la Bouzule et le CALCOSOL vertique de Lagny (CRU identique de 27%). Les faibles potentialités culturales de ces sols sont liées d'une part à leurs teneurs élevées en argile et à leur sensibilité aux alternances climatiques (Aboud et Florentin, 1989) et d'autre part à leur faible potentiel de minéralisation et à leur fort pouvoir d'organisation de l'azote engrais (Vong *et al.*, 1989; Chéloufi, 1991).

Les différences de CRU que nous observons en fonction des divers sols sont en accord avec les résultats trouvés par Destain *et al.* (1991) ; ces auteurs trouvent des CRU élevés, pour le blé et l'orge d'hiver, en relation avec les terroirs et l'époque d'application de la fumure mais non avec la dose.

Enfin pour les sols lorrains ayant reçu des apports de fumier et présentant des CRU conformes à la bibliographie, mais n'engendrant pas d'augmentation des rendements, il faudrait s'interroger sur l'intérêt d'apports de fertilisants azotés pouvant conduire à une surfertilisation, avec des risques pour l'environnement et des gaspillages des ressources économiques pour les agriculteurs.

Pour les doses X appliquées au stade 7-8 feuilles (sols lorrains), nous avons obtenu dans presque tous les cas des augmentations de CRU (planche 5.6 ; tableau 5.14).

Ces augmentations se situent entre 4 et 11%, pour la plupart des sols. Cependant le NEOLUVISOL de la Bouzule et le CALCOSOL de Lagny (sites 5₂ et 7) présentent des augmentations respectives de 31 et 44%. Par contre le RENDOSOL de Noviant présente une diminution (site 4). Notons que l'absorption de l'engrais apporté à des stades légèrement différents a pu coïncider avec des précipitations différentes suivant les sites, avec modification des constantes d'alimentation des plantes.

Ces apports tardifs conduisent à une augmentation de CRU, mais celle-ci n'est pas significative statistiquement pour les années d'observation (tableau 5.15) ; de plus elles ne se traduisent pas par

une augmentation des rendements. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Desvignes (1988) et Onnis (1990).

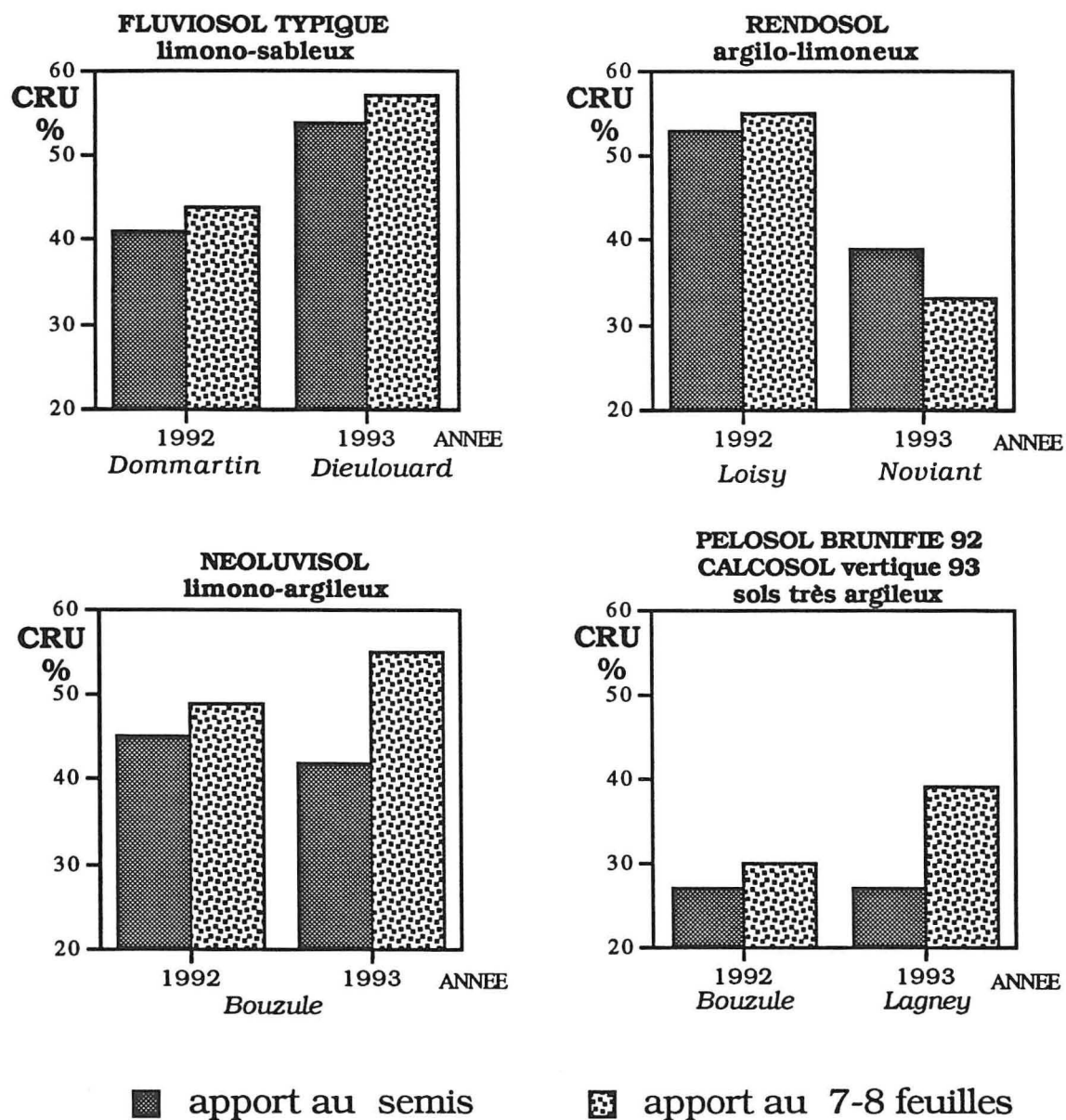


Planche 5.6 : comparaison des CRU en fonction de la période d'apport du fertilisant

Au Mexique

Les résultats des CRU pour le premier et deuxième apport d'engrais azoté ainsi que pour le total des deux apports sont présentés dans le tableau 5.16 ; rappelons que toutes les valeurs de CRU ont été calculées par rapport à la dose totale d'engrais.

Le test de "t" de Student pour comparer les moyennes ne donne de différence significative pour aucune moyenne au seuil de 0.10 (tableau 5.15) ; nous pouvons donc dire que statistiquement toutes les moyennes de CRU sont égales par rapport à la dose de N quel que soit le sol. Notons également que la plupart des écarts types sont élevés.

Une première observation montre des CRU très élevés par rapport aux sols sous climats tempérés ; en effet, pour le VERTISOL les CRU des parties aériennes s'échelonnent entre 54 et 61% ; quant au FLUVIOSOL TYPIQUE les valeurs encore plus élevées s'échelonnent entre 68 et 81. Ceci est vraisemblablement lié aux apports fractionnés et l'application en bandes du fertilisant azoté, facilitant le prélèvement de la plante et limitant l'organisation microbienne des sols.

Tableau 5.16: Coefficient Réel d'Utilisation de l'engrais azoté (%) dans le deux sols mexicains cultivés en maïs.

Doses N kg ha-1	10) VERTISOL			11) FLUVIOSOL TYPIQUE		
	1er* apport	2ème* apport	total	1er* apport	2ème* apport	total
60	24±1,4	30±3,6	54±5	26±10,9	43±1,3	68±12,2
90	25±5	30±5,7	55±10,7	33±6,9	41±1,2	74±8,2
120	26±2,1	35±1,1	61±3,2	29±6,7	52±0,3	81±7

* CRU calculés par rapport à la dose totale d'engrais azoté

Même si les différences de CRU entre les doses d'azote ne sont pas significatives statistiquement, il est évident que le CRU maximum n'est pas obtenu à la dose X (préconisée dans la région) ; celle-ci correspond néanmoins à la dose optimum par rapport aux rendements en grains ; cependant cet azote fertilisant absorbé permet d'augmenter les rendements en matière sèche (tableau 5.9)

ce qui laisse sous-entendre que même au-delà d'une dose optimale par rapport au rendement, la plante continue à absorber de l'azote engrais, lequel contribue davantage à l'élaboration de matière sèche en améliorant la qualité du grain. Olson (1980) signale qu'un apport supplémentaire de 100 Kg N ha⁻¹ n'augmente pas le rendement et entraîne une augmentation du CRU de seulement 6% ; par contre les pertes sont plus importantes avec la dose élevée ; il conclut alors que si l'on ne trouve pas de différence de CRU, il ne faut pas dépasser la dose avec laquelle on obtient le rendement optimal afin d'éviter les risques écologiques.

Les CRU partiels obtenus au premier et deuxième apport d'azote s'étalent d'une façon logique, donnant des CRU plus faibles aux apports au stade 2-3 feuilles et des CRU plus élevés aux apports au stade 7-8 feuilles, confirmant que l'utilisation de l'azote engrais par la plante croît en fonction du développement végétatif (Recous *et al.*, 1988b ; Destain *et al.*, 1991 ; Carlotti, 1992).

Remarquons les écarts types élevés pour la moitié des données, spécifiquement pour les CRU de la dose X du VERTISOL, et les CRU des premiers apports du FLUVIOSOL TYPIQUE. Cette grande variation est observée par rapport aux teneurs d'azote total des plantes et aussi par rapport à leurs excès isotopiques. D'une façon générale nous pouvons noter que si pour le VERTISOL la variation se rencontre dans les deux apports, dans le cas du FLUVIOSOL cette variation est surtout située dans le premier apport.

La variation des CRU et de la quantité d'azote prélevé par la plante dans le VERTISOL peuvent être expliquées par la grande hétérogénéité de ces sols argileux qui présentent des phénomènes d'inversion de couches ("*self mulching*") pendant la saison sèche, ce qui se traduit à la saison humide (Juin-Janvier) par l'apparition de surfaces microondulées (gilgaïs). Les effets de cette hétérogénéité sont atténués par la grande capacité de rétention en eau de ces sols (Palma-López, 1985b ; Trujillo et Palma-López, 1990), qui pondère les effets des variations hydriques au début de la saison des pluies en Juin et Juillet (cf. planche 5.2).

Par contre dans le FLUVIOSOL TYPIQUE la capacité de rétention en eau est plus faible, et du fait de l'intense chaleur du mois de juin (planche 5.2) et du bon drainage de ces sols, ces derniers sont sensibles aux déficits hydriques en début de saison des pluies. A partir du mois de Juillet la saison des pluies est déjà bien

établie et les variations hydriques de ces sols sont presque inexistantes (Palma-López, 1984 et 1985b ; Trujillo et Palma-López, 1990).

Nous constatons une différence nette entre les CRU obtenus pour les deux sols puisque le FLUVIOSOL TYPIQUE présente des CRU de 20 à 25% plus élevés que le VERTISOL, Ceci n'est pas en accord avec les rendements en grains et en matière sèche et avec l'azote prélevé par le maïs (tableaux 5.9 et 5.11), puisque ces données mesurées dans le VERTISOL étaient plus importantes. Par contre les classifications de potentialités de ces sols (tableaux 5.3, 5.4 et 5.8) justifient les différences de CRU observées (fig 5.3) ; en effet, le sol à aptitude culturale intermédiaire (VERTISOL) présente des CRU plus faibles et le FLUVIOSOL a des CRU plus importants. Une possible explication est donnée par le suivi de l'azote prélevé par le maïs pendant le cycle cultural (fig 5.5), car ce suivi montre que le VERTISOL présente un prélèvement d'azote plus intense jusqu'à 55 jours après le semis, mais ensuite les prélèvements mesurés dans la plante diminuent sensiblement. Le FLUVIOSOL par contre continue à prélever l'azote jusqu'à la date de la récolte, mais la quantité finale d'azote prélevé est inférieure à celle du VERTISOL (131 et 117 kg N ha⁻¹ respectivement pour le VERTISOL et le FLUVIOSOL). Les périodes excédentaires en eau à partir du mois d'août pourraient diminuer la capacité d'absorption du VERTISOL (sol à texture plus argileuse et donc plus sensible aux excès en eau) ; en plus ces différences de CRU doivent être en rapport avec la capacité d'organisation de l'azote engrais de chaque sol, théoriquement plus forte dans les sols plus argileux (fig 5.3).

Il s'agit du premier essai pour mesurer l'efficacité de l'engrais azoté sur le maïs dans la région de Tabasco ; nous ne pouvons donc pas comparer nos résultats avec ceux d'autres chercheurs.

5.3.5. CALCUL DE LA VALEUR A DES SOLS ET DE L'ANI APPARENTE.

Pour pouvoir calculer la valeur A des sols (A sol) et l'"*Added Nitrogen Interaction*" (ANI) nous avons fait appel aux concepts développés respectivement par Fried et Dean (1952) et Jenkinson *et al* (1985).

Le concept de la valeur A (A sol) repose sur l'hypothèse suivante : lorsqu'une plante est en présence de différentes sources d'azote, l'absorption à partir de chacune de ces sources est proportionnelle à la quantité d'azote disponible pour la plante dans ces différentes sources, toutefois une difficulté majeure, l'application de ce concept consiste à limiter dans la mesure du possible les interactions sol-engrais (Fried et Dean, 1952 ; Hauck et Bremner; 1976 ; Ganry, 1990). La valeur A est alors une estimation du "pouvoir alimentaire" en azote du sol exprimée en kg N ha⁻¹ d'équivalent engrais. Les équations de base pour le calcul sont présentées dans le chapitre des techniques et méthodes (chapitre II) ; rappelons ici seulement l'équation à partir de laquelle nous avons obtenu nos valeurs (Hauck et Bremner, 1976 ; Guiraud, 1984 ; Zapata, 1990 ; Ganry, 1990).

$$\text{Valeur A} = X \times \frac{100 - \text{Ndff}\%}{\text{Ndff}\%} = X \times \frac{\text{Ndfs}\%}{\text{Ndff}\%}$$

Avec: X = azote engrais apporté en kg ha⁻¹

Ndff % = azote provenant de l'engrais ("*Nitrogen derived from fertilizer*") en % de l'azote prélevé par la plante.

Ndfs % = azote provenant du sol ("*Nitrogen derived from soil*") en % de l'azote prélevé par la plante.

L'ANI ("*Added Nitrogen Interaction*" (ANI) ou Interaction dans le sol entre azote natif et azote apporté) est l'interaction positive ou négative de l'azote apporté comme engrais sur les fournitures d'azote du sol (Ndfs) ; l'ANI peut être réelle, par exemple si l'engrais azoté permet une augmentation du volume de sol exploité par les racines ou accroît la biomasse microbienne du sol ; l'ANI peut être apparente, par exemple s'il y a substitution entre le "pool" labile et

les compartiments plus ou moins stables de l'azote du sol. Le concept est relié à l'effet souvent observé qu'une culture ayant reçu une fertilisation azotée, prélève plus d'azote provenant du sol qu'une culture n'ayant pas reçu d'apports d'engrais azotés. (Hauck et Bremner, 1976 ; Jenkinson *et al*, 1985). Dans notre cas nous avons calculé l'ANI par la différence entre le QNdfs du traitement fertilisé et le Ndfs du témoin sans azote ces deux valeurs étant exprimées en kg N ha⁻¹ (Azam *et al*, 1993). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5.17

La valeur A (A Sol)

Nous remarquons qu'il y a toujours une variation de la valeur A par rapport à la dose d'azote apportée (même si les doses ne diffèrent que de 20 kg N ha⁻¹). Cependant, faisant un test statistique pour prouver l'homogénéité des moyennes (test "t" de Student), nous remarquons que presque toutes les différences entre les moyennes des doses employées sont non significatives au seuil de 0,10%, même pour la plupart des doses de 1993 en Lorraine où l'écart entre doses avec ¹⁵N était plus grand (tableau 5.18).

Notons cependant que quelques doses de certains sols montrent des différences significatives et hautement significatives. En effet, le FLUVIOSOL de Dommartin montre une différence significative entre la dose X et X+20 (respectivement 75 et 95 kg N ha⁻¹) mais, rappelons que ce sol n'a pas eu de réponse à l'engrais azoté.

Les deux sols alsaciens présentent des différences significatives pour les doses X-20 et X pour l'année 1992, mais pour l'année culturale suivante (1993) ces différences ont disparu entre les doses X-20 et X+20. Pour le CALCOSOL d'Obernai cette différence significative s'explique du fait des problèmes liés à l'expérimentation en 1992, conduisant à des erreurs de mesure pour la dose X, ceci ayant affecté tous les calculs effectués. Pour le FLUVIOSOL de Meyenheim nous n'avons pas d'arguments pour expliquer ce changement de comportement.

Pour l'année 1993 en Lorraine le CALCOSOL de Lagny et le NEOLUVISOL de la Bouzule montrent des différences hautement significatives entre les doses X-60 et X (respectivement 20 et 80 kg N ha⁻¹) ; comme nous l'avons déjà indiqué pour les CRU, ces deux

Tableau 5.17 : expression des variables concernant l'azote lors de deux années culturales en maïs

SOLS	Sites/Années	Doses N kg ha ⁻¹	N préL kg ha ⁻¹	CRU %	Ndff		Ndfs		A sol** kg ha ⁻¹	ANI*** kg ha ⁻¹
					%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹		
FLUVIOSOL TYPIQUE limono-sableux	Dommartin (site 1) 1992	0	170	-	0	0	100	170	-	-
		55	187	48	14	27	86	160	330	-10
		75	213	41	14	31	86	182	454	12
		75*	172	44	19	33	81	139	324	-31
	95	212	49	22	47	78	165	331	-5	
	Dieulouard (site 2) 1993	0	133	-	0	0	100	133	-	-
		30	162	54	11	16	89	146	264	13
		120	217	54	30	64	70	153	286	20
120*		214	57	32	69	68	145	258	12	
210	232	48	43	101	57	131	277	-2		
RENDOSOL argilo-limoneux	Lolsy (site 3) 1992	0	112	-	0	0	100	112	-	-
		70	174	44	18	31	82	143	331	31
		90	176	53	27	48	73	128	244	16
		90*	175	55	28	49	72	126	236	14
	110	182	48	29	52	71	130	273	18	
	Noviant (site 4) 1993	0	77	-	0	0	100	77	-	-
		20	83	39	10	8	90	75	189	-2
		80	134	39	24	31	76	103	260	26
80*		123	33	20	26	80	97	337	20	
140	146	39	38	55	62	91	228	14		
NEOLUVISOL limono-argileux	Bouzule (site 5 ₁) 1992	0	102	-	0	0	100	102	-	-
		60	158	41	16	25	84	133	310	31
		80	201	45	18	36	82	165	371	63
		80*	212	49	18	39	82	173	375	71
	100	175	41	23	41	77	134	327	32	
	Bouzule (site 5 ₂) 1993	0	89	-	0	0	100	89	-	-
		20	110	66	11	13	89	97	161	8
		80	132	42	24	33	76	99	253	10
80*		132	55	32	44	68	88	177	-1	
140	177	48	37	67	63	110	238	21		
PELOSOL BRUNIFIE	Bouzule (site 6) 1992	0	91	-	0	0	100	91	-	-
		45	100	17	8	8	92	92	508	1
		65	135	27	13	18	87	117	439	26
		65*	106	30	19	20	81	86	285	-5
85	117	19	15	17	85	100	490	9		
CALCOSOL vertique	Lagny (site 7) 1993	0	115	-	0	0	100	115	-	-
		20	154	43	6	8	94	146	332	31
		80	163	27	14	22	86	141	489	26
		80*	143	39	21	31	79	112	318	-3
140	159	31	27	43	73	116	372	1		
CALCOSOL limoneux	Obernai (site 8 ₁) 1992	0	140	-	0	0	100	140	-	-
		80	209	43	18	35	82	174	376	11
		100	187	40	23	40	77	147	337	0
		120	227	43	24	52	76	175	382	13
	Obernai (site 8 ₂) 1993	0	111	-	0	0	100	111	-	-
		80	147	34	23	27	77	120	271	-
120	188	39	31	47	69	141	270	-		
FLUVIOSOL BRUNIFIE sablo-caillouteux	Meyenheim (site 9 ₁) 1992	0	117	-	0	0	100	117	-	-
		180	212	48	40	86	60	126	268	9
		200	255	54	41	107	59	148	287	31
		220	252	52	45	114	55	138	271	21
	Meyenheim (site 9 ₂) 1993	0	158	-	0	0	100	158	-	-
		180	235	49	44	88	56	147	229	-
220	241	42	44	92	56	149	276	-		
VERTISOL fluvique	Mexique (site 10) 1992	0	53	-	0	0	100	53	-	-
		60	90	54	36	32	64	58	108	9
		90	125	55	39	49	61	76	139	31
		120	137	61	53	73	47	64	106	21
FLUVIOSOL TYPIQUE limono-sableux	Mexique (site 11) 1992	0	46	-	0	0	100	46	-	-
		60	82	68	50	41	50	41	59	-5
		90	112	74	59	66	41	46	62	0
		120	115	81	85	97	15	18	22	-28

Valeurs des variables arrondies et calculées à partir des données de chaque répétition

* Dose apportée au stade 7-8 feuilles

** A sol en kg N ha⁻¹ équivalent ammonitrate

** ANI apparente en kg N ha⁻¹

sols présentent des écart types très importants dans le calcul des moyennes, ceci reflète donc une hétérogénéité du sol, laquelle est plus prononcée pour le CALCOSOL de Lagney présentant aussi des différences significatives entre les doses X et X+60.

Par rapport à cette analyse générale nous pouvons noter que la plupart de nos résultats sont en accord avec plusieurs travaux qui indiquent des valeurs A indépendantes des doses de N apporté (Fried et Dean, 1952 ; Standford *et al*, 1973 ; Hauck et Bremner, 1976 ; AIEA, 1983 ; Ganry; 1990 ; Azam *et al*, 1993 ; Badiane, 1993 ; Hamid et Ahmad, 1993). Remarquons que sur les essais du Mexique l'apport de l'engrais a été fait sous forme localisée (bande), ce qui évidemment ne permettra pas l'expression maximale de la valeur A du sol, du fait d'un volume inférieur de terre exploré par les racines (Ganry, 1990). En effet, dans ces sols les valeurs de A sol sont petites par rapport au potentiel de fourniture en azote des sols tropicaux.

Dans certaines doses dépassant la dose à l'optimum de la courbe de réponse, il existe une relation entre la diminution des valeurs de A et l'augmentation de Ndff dans la plante (tableau 5.17) ; ceci, en accord avec les résultats trouvés par Ganry (1990), ne nous autorise pas à imputer cette diminution de la valeur A à une diminution du "pool" disponible en azote du sol, mais plutôt à un effet de substitution de "pools" (Machet *et al*, 1987) ; ceci serait lié à des coefficients d'efficacité différents entre l'azote engrais et l'azote endogène du sol. Rappelons que le principe de l'équation de calcul de la valeur A est basé sur des coefficients égaux d'efficacité pour les deux sources d'azote (Fried et Dean, 1952).

Par ailleurs il faut rappeler que ces résultats de A sol ont été calculés à partir des valeurs mesurées seulement sur les parties aériennes du maïs (du fait de la difficulté et variabilité de dosage et prélèvement des racines) ; ceci conduit à sous-estimer la valeur A du sol. La variation de A sol pourrait, peut être, avoir été diminuée si l'on avait mesuré l'effet racinaire (Standford *et al*, 1973).

Jenkinson *et al*. (1985) ont démontré que la valeur A peut être affectée par divers facteurs, entre autres : le taux d'immobilisation (organisation) de l'azote du sol qui entraîne des valeurs A différentes avec différentes doses de N et l'ANI, s'il y a eu ANI positive par effet de substitution de pools. Ces auteurs en se référant à d'autres travaux montrent que quelquefois A sol est augmentée avec les apports de N, quelquefois reste constante et quelquefois diminue ; en plus Legg et

Standford (1967) trouvent que les valeurs A correspondant aux doses intermédiaires sont plus grandes que pour les doses plus élevées ou plus basses. En résumé pour que la valeur A donne une mesure correcte du pouvoir du sol à fournir l'azote, il faut : que la croissance de la plante soit affectée par les apports de N, et qu'il n'y ait pas de substitution de pools (Jenkinson *et al.*, 1985).

En fonction de ce que nous avons discuté, nous retiendrons dans la suite seulement les valeurs A moyennes (exprimées en kg N ha⁻¹ équivalent ammonitrate) des doses apportées au semis pour les sols n'ayant pas présentés de différences significatives entre doses. Pour les autres sols nous éliminerons pour le calcul de la moyenne les doses ayant eu des différences significatives tout en conservant au moins deux valeurs pour le calcul. Les résultats par type de sol sont présentés dans la planche 5.7.

Dans le cas des sols tropicaux on observe les plus faibles valeurs de A : respectivement 108 et 68 kg N ha⁻¹ équivalent ammonitrate pour le VERTISOL et le FLUVIOSOL. Rappelons que ces sols ont reçu l'apport d'azote en bandes ; les valeurs A sont donc sous-estimées du fait que les racines n'explorent pas tout le volume de terre exploitable ; les racines trouvent l'azote provenant de l'engrais dans leur entourage le plus proche. Cela diminue le volume de terre exploré et donc la quantité d'azote du sol prélevée par les racines ; ceci est constaté par les CRU élevés de ces sols ainsi que l'augmentation de la fraction de N provenant de l'engrais (N_{dff}) dans la plante (plus évident sur le FLUVIOSOL) ; la contribution du sol est donc diminuée (Ganry, 1990).

Gliessman (1982) mesurant les variations d'azote total dans la plante et dans le sol pour plusieurs agro-systèmes, y compris le maïs, de la région de Tabasco, trouve que la véritable richesse en azote de ces sols dépend plutôt du taux de recyclage de la biomasse dans le système que des teneurs en azote du sol lui-même.

Dans les conditions tropicales humides le cycle de l'azote est rapide ; nous n'avons donc pas un enrichissement du pool d'azote labile (Vitousek et Matson, 1988). Ceci est surtout valable dans le cas des monocultures, comme en témoigne les travaux de Guerrero *et al.*, (1990). Ces auteurs trouvent pour les VERTISOLS de Tabasco des N_o (N potentiellement minéralisable) de 109 et 135 mg N kg⁻¹ sol et des constantes de minéralisation (K par semaine) de 0,123 et

0,092, respectivement pour des monocultures de canne à sucre et

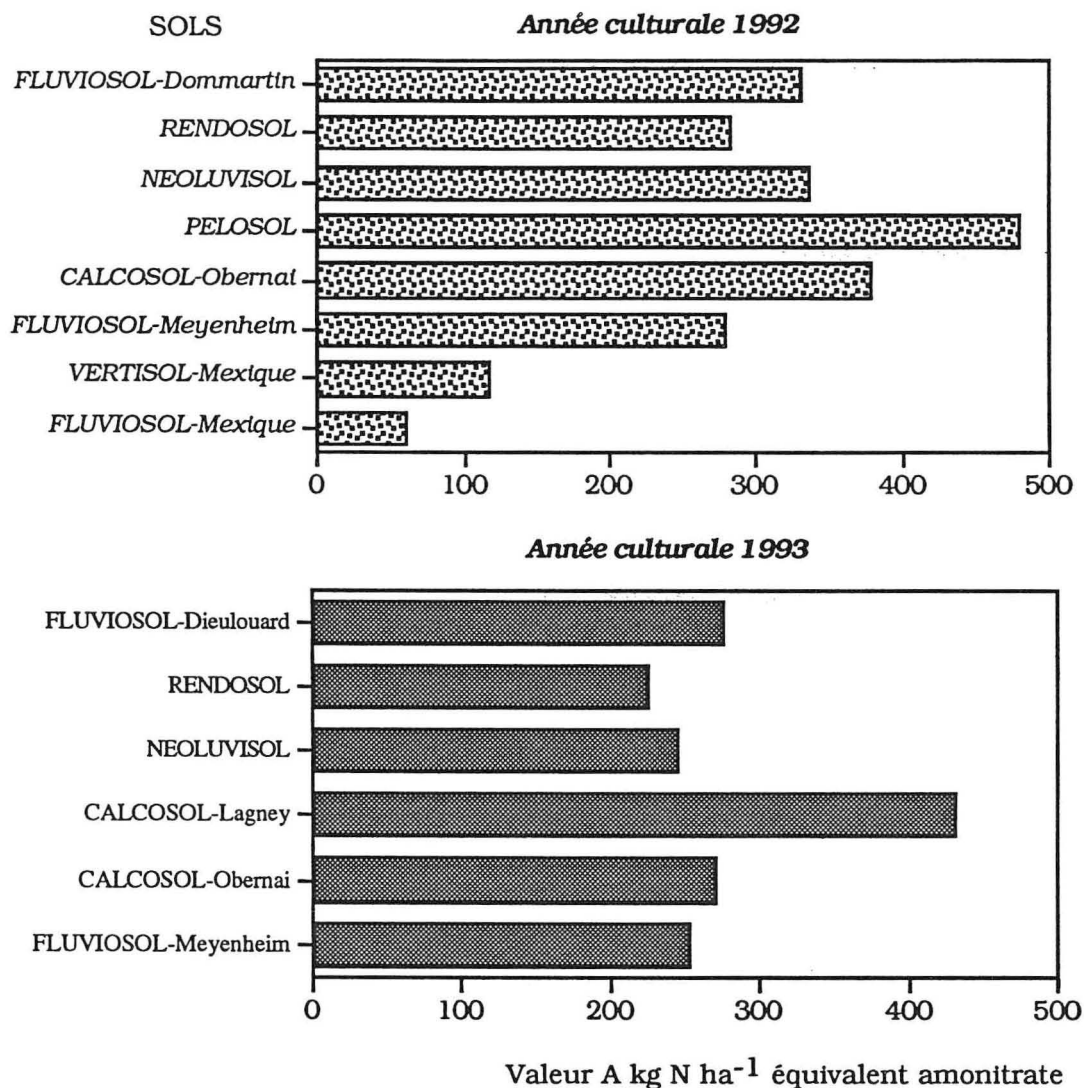


Planche 5.7 : valeur A moyenne par type de sol lors de deux années culturales.

de riz. A partir de ces données Guerrero *et al*, (1991) constatent des valeurs d'azote stable très basses dans ces sols, équivalentes à 503 et 873 kg N ha⁻¹ pour ces mêmes cultures, tandis que pour des cultures à cycle de biomasse végétale avec un minimum d'exportation la valeur de N stabilisé est de 1128 kg N ha⁻¹ pour le cacao et de 5931 kg N ha⁻¹ pour une pelouse tropicale.

Si nous examinons les sols tempérés, nous constatons une certaine homogénéité et des valeurs nettement plus élevées que dans les sols situés sous climats tropicaux. De prime abord on observe un effet de l'année climatique ; en effet, nous constatons des valeurs A

plus petites pour l'année 1993 (planche 5.7). Outre cet effet climatique, il nous faut souligner les cas extrêmes des sols très argileux à potentialités médiocres (PELOSOL de la Bouzule et CALCOSOL vertique de Lagny qui présentent respectivement des valeurs A de 479 et 431 kg N ha⁻¹) ; ceci pourrait être expliqué par un apport de fumier dans ces sols (Badiane, 1993), en complément d'une forte teneur en composés organiques. Notons que le Ndff et les CRU sont très faibles dans ces sols (tableau 5.17).

Pour ces sols tempérés nous pouvons établir une certaine relation avec nos classements de potentialités ; nous observons que pour l'année 1992, la hiérarchie est plus ou moins respectée car les sols à meilleure potentialité montrent les valeurs les plus élevées (CALCOSOL d'Obernai, NEOLUVISOL de la Bouzule et FLUVIOSOL de Dommartin avec respectivement 379, 336 et 330 de valeur A). Le RENDOSOL de Loisy à aptitude médiocre a seulement 283 pour la valeur A, tandis que la valeur A du FLUVIOSOL de Meyenheim n'est que de 279, malgré l'utilisation d'un itinéraire technique performant ; ceci peut être lié davantage à la profondeur de sol ; rappelons aussi que ce sol est classé à aptitude culturale intermédiaire.

Pour l'année 1993 les classements de potentialité des sols semblent être mieux respectés : les deux sols qui présentent les valeurs A les plus élevées sont le FLUVIOSOL de Dieulouard (valeur A de 276) et le CALCOSOL d'Obernai (valeur A de 271) ; ces deux sols sont classés à bonne potentialité agricole. Nous avons ensuite le FLUVIOSOL de Meyenheim et le NEOLUVISOL de la Bouzule avec respectivement 253 et 246 de valeur A ; les deux sols sont classés à potentialités intermédiaires. Enfin à nouveau le RENDOSOL, présente les valeurs A les plus petites (226), avec une classe de potentialité médiocre (tableau 5.8 ; planche 5.7).

L'interaction entre l'azote engrais et l'azote endogène du sol (l'ANI "Added Nitrogen Interaction")

D'après plusieurs auteurs il existe une interaction entre les apports d'azote engrais et les fournitures d'azote provenant du sol aux plantes ; cette interaction peut être positive si l'on constate une augmentation des fournitures azotées du sol dans le traitement fertilisé par rapport au témoin sans engrais (Broadbent et

Nakashima, 1971 ; Hauck et Bremner, 1976 ; Jenkinson *et al.*, 1985 ; Hart *et al.*, 1986 ; Taureau, 1987 ; Machet *et al.*, 1987 ; Ganry, 1990 ; Azam *et al.*, 1991 et 1993 ; Hamid et Ahmad, 1993 ; Sulce, 1993 ; Alfaia, 1993) ; elle est négative ou nulle, si $Q_{Ndfs} \leq N$ prélevé par le témoin sans azote (Olson, 1980 ; Sorensen, 1982 ; Recous *et al.*, 1988b ; Dalemberg et Jager, 1989 ; Azam *et al.*, 1991 ; Badiane, 1993). Si la plupart des auteurs ont constaté l'ANI ("*added nitrogen interaction*"), il n'y a pas accord sur l'explication. Jenkinson *et al.*, (1985), faisant une excellente synthèse des différentes théories concernant l'effet ANI démontrent qu'en fonction des nombreux facteurs qui peuvent jouer dans un protocole expérimental nous pouvons avoir des ANI liées à différentes causes. Ainsi si l'apport d'azote conduit à une minéralisation plus intense de l'azote organique du sol ou bien à une exploration racinaire plus grande, nous assistons donc à une ANI réelle. Si nous ne constatons pas ces effets nous aurons alors des ANI apparentes. Cette ANI apparente peut être due à plusieurs causes :

- par déplacement de réactions par exemple déplacement des ions ammonium fixés aux argiles par des ions ammonium provenant du fertilisant, l'ammonium du sol peut alors être plus facilement prélevé ;

- par substitution de "pools" qui peut intervenir suivant différents mécanismes : l'azote marqué peut prendre la place de l'azote non marqué dans les "pools" labile ou organisé du sol, ou au moment du prélèvement d'azote par la plante en l'absence d'organisation importante, ou lors de la dénitrification (Jenkinson *et al.*, 1985 ; Recous, 1988 ; Sulce, 1993 ; Alfaia, 1993).

Nos résultats (tableau 5.17 ; planche 5.8) montrent que dans la plupart des cas nous avons eu des ANI positives ; rappelons que nous avons éliminé de notre discussion les essais alsaciens de 1993 car ils comportaient des témoins double zéro, ceci nous empêchant d'utiliser la formule de Azam *et al.*, (1993).

Il y a cependant deux essais où les ANI calculées sont majoritairement négatives : le FLUVIOSOL de Dommartin (1992) et le FLUVIOSOL du Mexique (1992).

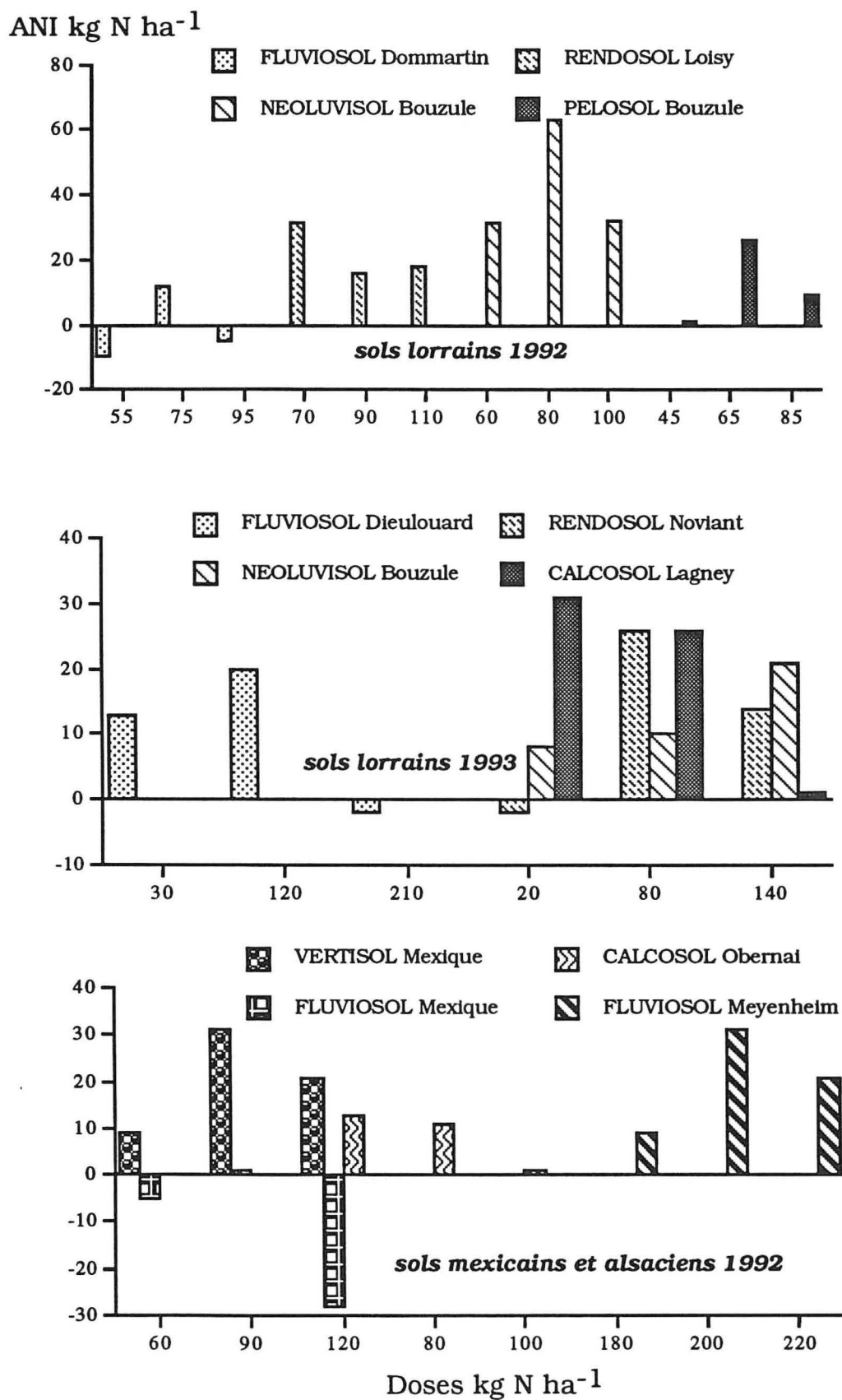


Planche 5.8 : ANI apparente des sols étudiés en fonction des doses d'engrais azoté apporté

Probablement dans les cas du sol de Dommartin ce manque d'interaction est dû à une absence de réponse à l'azote engrais car si l'azote n'est pas le facteur limitant majeur on observe des ANI négatives (Jenkinson *et al.*, 1985 ; Taureau, 1987) ; ceci met à nouveau en question l'apport de fertilisants azotés dans des sols recevant des apports importants de fumiers.

Pour le FLUVIOSOL mexicain, nous avons déjà discuté sur les faibles contributions de l'azote du sol à l'alimentation de la plante (CRU élevé, valeur A très faible, apport localisé et fractionné de l'engrais) ; ceci provoque des fournitures d'azote du sol faibles et donc manque d'interaction avec l'azote engrais (tableau 5.17)

Notons que dans le PELOSOL de la Bouzule, malgré aucune réponse à l'engrais, nous constatons des ANI positives ; rappelons que ce sol avait présenté aussi des valeurs A très élevées ; l'influence d'un stock important d'azote organique dans le sol a donc permis une certaine interaction avec l'azote engrais.

Dans le cas des ANI positives la plupart des sols montrent des ANI faibles avec les doses faibles. Pour les doses à l'optimum de la courbe de réponse nous observons les ANI les plus importantes, et finalement l'ANI baisse à nouveau avec les doses les plus élevées, ceci en accord avec Jenkinson *et al.* (1985) et Azam *et al.* (1993). Ces tendances varient avec les types de sols (tableau 5. 17 ; planche 5.8).

Considérons également que les valeurs de Ndfs et de la valeur A pour la plupart des sols restent relativement constantes par rapport aux doses d'azote (tableau 5.17). Nous pouvons dire alors que les doses d'azote engrais apportées n'entraînent pas une minéralisation sensible de l'azote organique du sol (mesurée par la fourniture azotée du sol) ; nous assisterions donc à des ANI apparentes positives dues à la substitution de "pools" (Jenkinson *et al.*, 1985 ; Machet *et al.*, 1987). Ceci est confirmé pour la présence dans la plupart des cas des valeurs de CAU supérieures aux CRU comme le signalent aussi Machet *et al.*, (1987) et Recous (1988).

D'autre part nous n'avons pas constaté lors des observations de profils racinaires (annexe II-10) d'accroissement apparent de la profondeur d'enracinement dans les traitement fertilisés par rapport au témoin et, de même, le Ndfs et le Ndff paraissent avoir des coefficients d'efficacité indépendants (tableau 5.17) (Machet *et al.*, 1987 ; Taureau, 1987) ; ceci nous confirme donc que l'ANI observée pour ces sols est apparente et résulte de substitution dans le "pool"

labile des sols correspondant à la biomasse microbienne (Jenkinson *et al*, 1985 ; Recous, 1988 ; Azam *et al*, 1991 et 1993 ; Hamid et Ahmad, 1993 ; Sulce, 1993 ; Alfaia, 1993).

Comparant les valeurs d'ANI des doses apportées au semis par rapport aux mêmes doses apportées au stade huit feuilles, nous constatons une diminution nette (voire des ANI négatives parfois), avec les seconds, ceci indiquerait que les effets de substitution de "pools" seraient plus actifs dans les périodes précoces avant le début de la période maximale d'utilisation d'azote par la plante (Jenkinson *et al*, 1985 ; Azam *et al*, 1991). L'azote engrais resterait donc dans la solution du sol un temps suffisamment grand pour que la biomasse microbienne l'utilise à la place de l'azote endogène du sol ; ceci diminuerait la concentration de l'azote engrais dans le "pool" soluble du sol avec pour conséquence l'augmentation de la concentration de l'azote minéral provenant du sol. L'action de la biomasse microbienne sur la grandeur de l'ANI reste donc une hypothèse à confirmer (cf. chapitre VI).

Considérant seulement les valeurs d'ANI à la dose à l'optimum de la courbe de réponse, nous ne constatons aucun lien entre ces valeurs et les potentialités des sols. Par contre un effet de l'année culturale semble se dégager pour les sols français ayant eu une réponse à l'azote engrais. Ceci n'est qu'une constatation : reste donc à multiplier les essais pour démontrer cet effet climatique sur les interactions entre l'azote engrais et l'azote endogène du sol.

5.3.6. RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTES VARIABLES MESUREES CONCERNANT L'AZOTE.

A partir des résultats discutés antérieurement, nous analyserons dans cette partie les relations existantes entre les différentes variables concernant l'azote pour mieux comprendre leurs incidences sur les résultats agronomiques dans les différents sols.

Corrélation des variables.

Nous avons vu combien il était difficile d'interpréter les résultats obtenus dans les essais sans réponse à l'azote engrais (sites 1 et 6 respectivement de Dommartin et de la Bouzule), de plus rappelons que les essais alsaciens en 1993 ont comporté des témoins double zéro ; nous ne pouvons donc nous autoriser à calculer certaines variables dépendant des résultats de l'azote prélevé par le témoin zéro (No) ; pour cette raison nous avons éliminé ces essais pour analyser les rapports entre les différentes variables azotées. Pour cette étude nos résultats correspondent aux diverses doses de fertilisant jusqu'à l'optimum de la courbe de réponse pour chaque site et nous avons calculé une matrice de corrélation (tableau 5.19).

L'un des couples de variable le plus fortement corrélé correspond à la dose d'azote apportée (dose N) et l'azote fourni par le fertilisant présent dans la plante en kg N ha^{-1} (QNdff), avec un coefficient de corrélation de 0,907.

Ensuite trois variables sont corrélées avec l'azote prélevé par le témoin zéro (No), ce sont : l'azote prélevé par la plante dans les traitements fertilisés (N pré), les valeurs de l'azote fourni par le sol présent dans la plante exprimé en kg N ha^{-1} (QNdfs) et la valeur A du sol (A sol) avec respectivement des valeurs de r de 0,824, 0,937 et 0,827 ; par contre le coefficient apparent d'utilisation de l'azote engrais (CAU) montre une légère corrélation négative avec No (-0,538).

Par ailleurs N pré. présente une bonne corrélation avec l'azote fourni par le sol en kg ha^{-1} (QNdfs), coefficient de 0,879, et celle-ci diminue avec la valeur A des sols (A sol), coefficient de 0,671 ; ceci montre bien que la plante prélève indistinctement l'azote minéral disponible quelle que soit son origine et de ce fait renforce les résultats obtenus par calcul de la valeur A.

Tableau 5.19 : matrice de corrélation des variables concernant l'azote.

	Dose N	No	Nprél	Ndff%	QNdff	Ndfs%	QNdfs	A sol	ANI	CRU	CAU
Dose N	1,000										
No	0,316	1,000									
Nprél	0,686	0,824	1,000								
Ndff%	0,436	-0,564	-0,152	1,000							
QNdff	0,907	0,097	0,563	0,678	1,000						
Ndfs%	-0,436	0,564	0,152	-1,000	-0,678	1,000					
QNdfs	0,303	0,937	0,879	-0,574	0,102	0,574	1,000				
A sol	0,231	0,827	0,671	-0,674	-0,102	0,674	0,867	1,000			
ANI	0,143	0,207	0,465	-0,264	0,090	0,264	0,508	0,430	1,000		
CRU	-0,015	-0,492	-0,221	0,758	0,384	-0,758	-0,487	-0,797	-0,206	1,000	
CAU	0,073	-0,538	-0,211	0,566	0,354	-0,566	-0,459	-0,548	0,062	0,558	1,000

L'azote fourni par le sol exprimé en % (Ndfs) est moyennement corrélé avec la valeur A (coefficient de 0,674), mais quand cette valeur est exprimée en kg N ha⁻¹ (QNdfs) le coefficient s'élève à 0,867 ; de plus cette dernière variable est la seule corrélée faiblement avec l'ANI apparente (coefficient de 0,508).

Notons que la valeur A des sols est corrélée négativement avec le CRU (coefficient de -0,797).

Remarquons que l'azote fourni par le fertilisant en % (Ndff) est faiblement corrélé avec le CAU (coefficient de 0,566).

Enfin nous trouvons aussi une très faible corrélation entre le CAU et le CRU, coefficient de 0,558.

Examinons un peu plus en détail quelques unes de ces relations au moyen de graphiques pour mieux visualiser le comportement des variables.

Rapport CRU-CAU.

De prime abord nous nous sommes intéressés, perspectives de développement rural oblige, aux relations existant entre CRU et CAU calculés dans nos essais. D'après les résultats de la bibliographie les

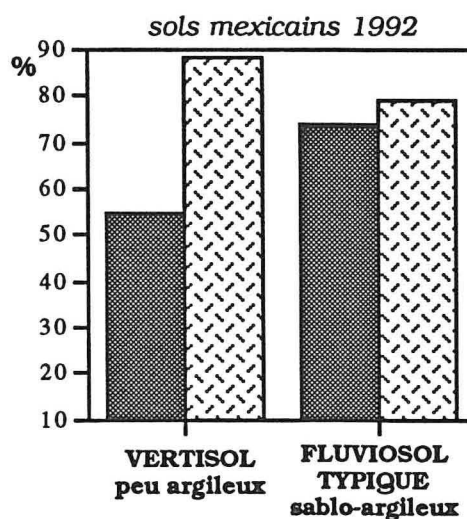
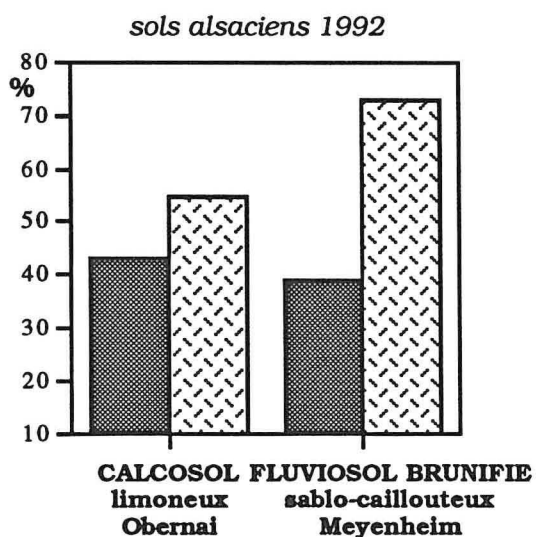
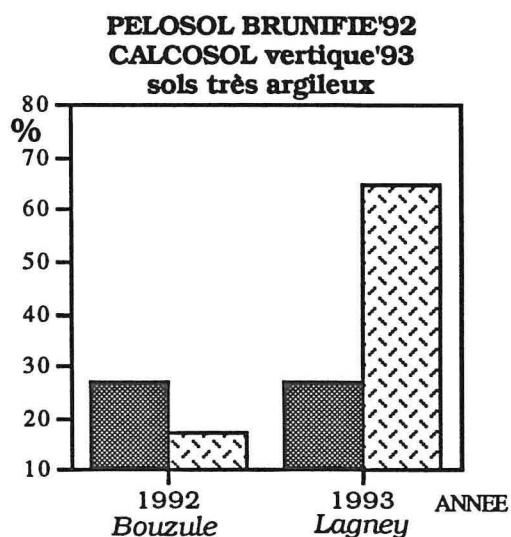
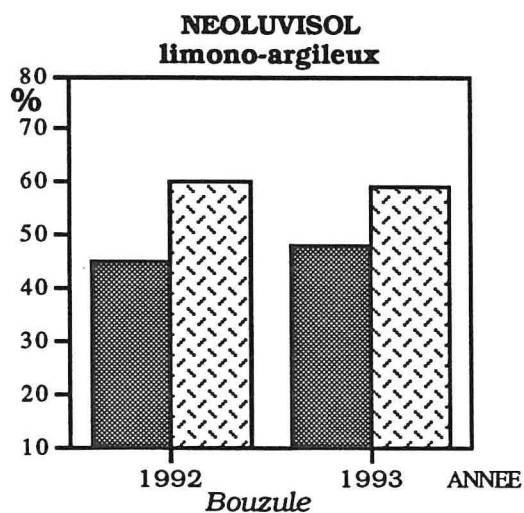
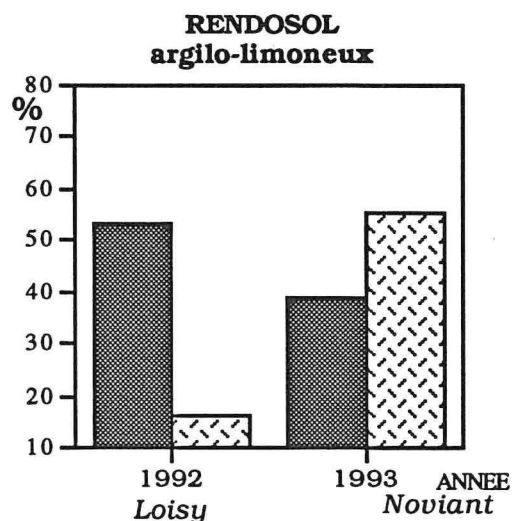
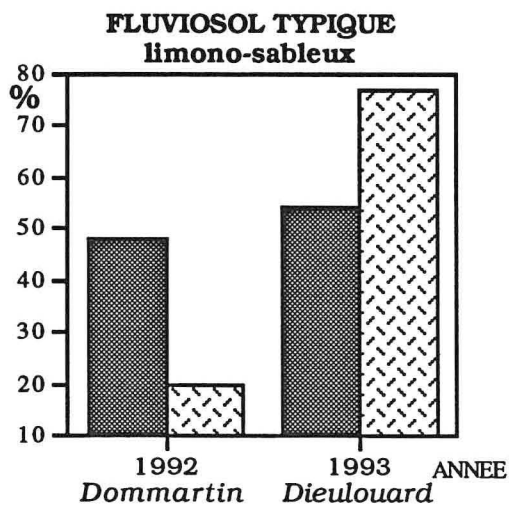
valeurs du CAU sont presque toujours plus élevées que les CRU du fait d'une sous-estimation de l'azote fourni par le sol mesuré sur la parcelle témoin sans azote (Hauck et Bremner, 1976 ; Jenkinson *et al.*, 1985 ; Machet *et al.*, 1987 ; Taureau, 1987 ; Carlotti, 1992 ; Koller, 1992 ; Desvignes, 1993).

Dans la Planche 5.9 nous présentons les graphiques comparant les valeurs de CAU et CRU en % pour les doses à l'optimum de la courbe de réponse de chaque site. Éliminant le FLUVIOSOL de Dommartin et le PELOSOL de la Bouzule pour les raisons déjà mentionnées auparavant, nous constatons que les valeurs de CAU sont en effet plus élevées que celles du CRU, avec cependant des différences d'amplitude dépendant du type de sol.

Cherchant à trouver une relation plus nette entre ces deux variables, la fig 5.4 considère toutes les valeurs des dix essais pour les doses suboptimales et à l'optimum de la courbe de réponse. Nous constatons qu'il existe une grande dispersion des données avec accumulation au centre de la courbe où les valeurs de CAU varient alors que celles du CRU restent constantes. Le r^2 obtenu reflète cette dispersion ($r^2=0,312$). Si nous traçons la bissectrice (ligne $y=x$), nous constatons qu'à une exception près toutes les valeurs de CAU sont plus grandes que le CRU.

En considérant uniquement la dose optimale nous constatons que les écarts les plus importants sont observés pour les FLUVIOSOLS de Dieulouard et de Meyenheim et le CALCOSOL verticale de Lagney, sols présentant des potentialités extrêmes. D'autre part pour les sols mexicains, si dans le VERTISOL le CAU est largement supérieur au CRU avec un maximum d'écart pour tous les cas examinés, à l'inverse dans le FLUVIOSOL TYPIQUE, sol à très bonne potentialité, nous rencontrons le minimum de différences.

Aussi, bien que la relation entre ces deux variables ne soit pas satisfaisante et semble davantage liée aux conditions climatiques (cf. annexe II-14), nous considérons qu'il faudrait poursuivre les essais sur le terrain afin de clarifier cette relation; ceci est surtout intéressant pour les pays en voie de développement, comme le Mexique, où les recherches sur l'optimisation de la fertilisation azotée, doivent être envisagées le plus économiquement possible ; et en fonction des contraintes liées au développement l'interprétation



■ CRU % ▨ CAU %

Planche 5.9 : comparaison entre CRU optimal et CAU correspondant

du CAU est davantage envisageable que l'emploi des isotopes (Etchevers *et al.*, 1993 ; Palma-López *et al.*, 1993 ; Volke et Garcia-Morin, 1993).

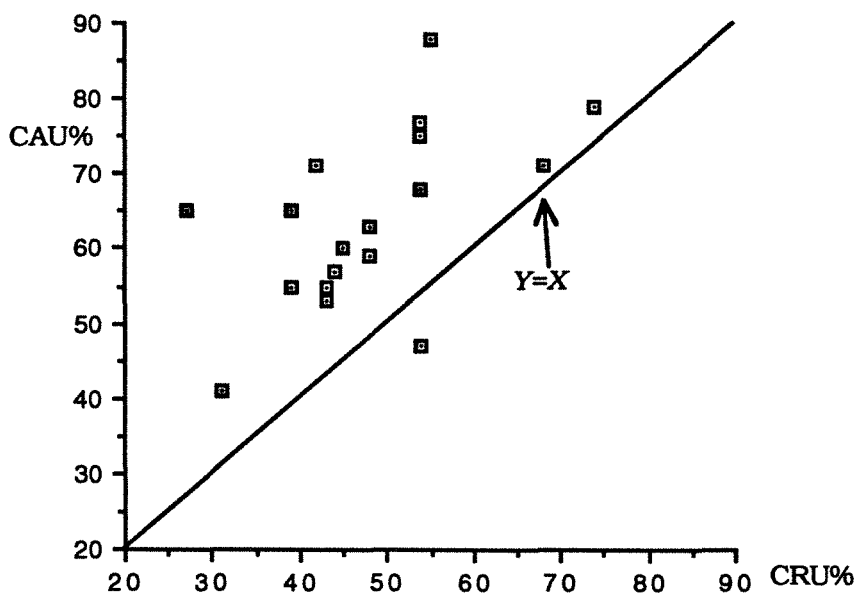


Fig 5.4 : variation des valeurs de CRU et CAU

Relation entre les diverses variables exprimant les fournitures azotées des sols

Nous avons constaté que l'utilisation du CAU au lieu du CRU comme paramètre de l'efficacité de la fertilisation azotée en pays en voie de développement pouvait être envisageable, même si nous n'avons pas une totale réponse dans nos résultats. Nous allons maintenant discuter une autre variable très importante pour l'utilisation de la formule du bilan simplifiée : les fournitures azotées du sol (Koller, 1991; Limaux, 1991 et 1994 ; Carlotti, 1992 ; Desvignes, 1992 et 1993 ; Palma-López *et al.*, 1993 ; CRAL-ENSAIA, 1993).

La méthodologie la plus fiable pour estimer les fournitures du sol fait appel aux techniques isotopiques permettant de calculer l'azote provenant du sol présent dans la plante (Ndfs) ; cependant, ceci entraîne des problèmes inhérents aux techniques isotopiques utilisées en plein champ (laboratoires spécialisés, ¹⁵N onéreux, apprentissage coûteux pour les agronomes chargés du développement, dépendance technologique, ...). Hauck et Bremner

(1976) mentionnent que même si les techniques isotopiques sont plus précises, on peut trouver des résultats statistiquement valables avec des techniques non isotopiques ; ils précisent que l'emploi de l'azote quinze doit être réservé aux situations dans lesquelles on ne peut pas utiliser une autre méthode (organisation de l'azote engrais, minéralisation d'une source organique, essais en conditions contrôlées pour modéliser les principes fondamentaux, explication d'un phénomène spécifique, ...) ; ce conseil est encore plus valable pour les pays en voie de développement. Dans ce contexte nous utiliserons les résultats obtenus avec l'aide de l'azote quinze pour justifier l'utilisation de techniques non isotopiques en vue d'estimer des fournitures globales d'azote de divers sols étudiés.

Reprenant les résultats utilisés pour l'analyse de corrélation multiple, nous avons fait une comparaison entre l'azote prélevé par le témoin sans azote (No) et les résultats de QNdfs et la valeur A (Planche 5.10). Dans les deux cas nous trouvons des relations acceptables (r^2 respectifs de 0,877 et 0,724). La courbe **(a)** montre que l'azote prélevé par le témoin est une bonne estimation de l'azote réellement fourni par le sol (Ndfs). Pour le développement incontestablement ce tableau montre que tout agriculteur peut suspendre l'épandage d'engrais sur une petite parcelle au sein d'une grande parcelle ayant le même itinéraire technique, afin d'estimer pour une culture donnée et une année climatique la fourniture en azote de différents types de sols rencontrés sur son exploitation ; en effet, les différentes classifications des sols sont basées sur des caractéristiques permanentes, or la production de biomasse végétale donc le niveau de potentialité, est souvent lié à la biodisponibilité de l'azote des sols, pendant la ou les phases d'absorption maximale par une plante donnée. Cette biodisponibilité de l'azote varie en fonction des types de sols et surtout de leur comportement bio-physico-chimique lié aux conditions climatiques.

D'autre part si nous traçons la bissectrice (ligne $y=x$), nous notons que dans la plupart des cas, les fournitures du sol estimées par le témoin sans azote engrais sous-estiment le Ndfs ; nous avons déjà discuté de ce fait lié à une ANI apparente positive (Jenkinson *et al*, 1985 ; Machet *et al*, 1987 ; Recous, 1988 ; Azam *et al*, 1993).

La courbe **(b)** montre les résultats de la comparaison de la Valeur A, en tant que valeur appréciant le pouvoir alimentaire du sol en azote, et l'azote prélevé par le témoin. Nous constatons une

relation satisfaisante entre ces deux variables ($r^2 = 0,724$). Par ailleurs dans le tableau 5.19, nous avons constaté une relation inversement proportionnelle entre le CRU et la valeur A ($r=-0,797$) et une bonne corrélation positive entre la valeur A et les fournitures d'azote du sol en kg N ha^{-1} (0,867) ; rappelons que la variable qui intervient pour le calcul de la valeur A est le Ndfs mais en % de l'azote prélevé par la plante. Ceci confirme l'utilité de la valeur A comme paramètre pour expliquer les fournitures azotées des sols (Fried et Dean, 1952 ; Hauck et Bremmner, 1976 ; Jenkinson *et al.*, 1985, Ganry, 1990 ; Badiane, 1993). Autre point important : cette valeur A n'est pas du tout corrélée avec les différentes doses de N apporté comme engrais (tableau 5.19).

Comme nous avons vu qu'il existe une corrélation inversement proportionnelle entre cette valeur A et le CRU, il nous faut donc admettre que la biodisponibilité des réserves organiques azotées du sol est régi par des paramètres pédoclimatiques souvent aléatoires ; il est donc difficile d'estimer les fournitures du sol d'où tout l'intérêt de suivre un témoin zéro pour des années climatiques différentes, dans le cadre d'un agrosystème déterminé et au cours de plusieurs rotations ; à noter que les premiers résultats obtenus en Lorraine (CRAL-ENSAIA, 1993) ont montré que les amplitudes de cette fourniture était très faibles pour certains types de sols (RENDOSOL) et au contraire extrêmement variables pour d'autres (PELOSOL).

Néanmoins; il apparaît souhaitable d'approfondir l'étude des interactions (effet ANI apparent) entre apports de fertilisants et fournitures du sol ; ainsi il serait possible de modéliser plus rigoureusement les relations entre ces variables et proposer des facteurs correctifs, applicables aux valeurs de l'azote prélevé par le témoin.

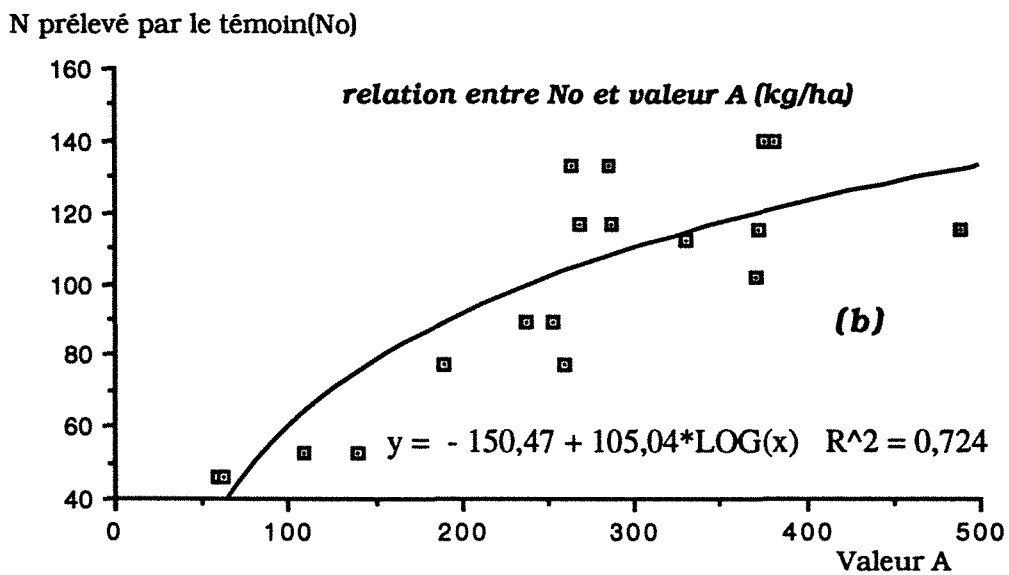
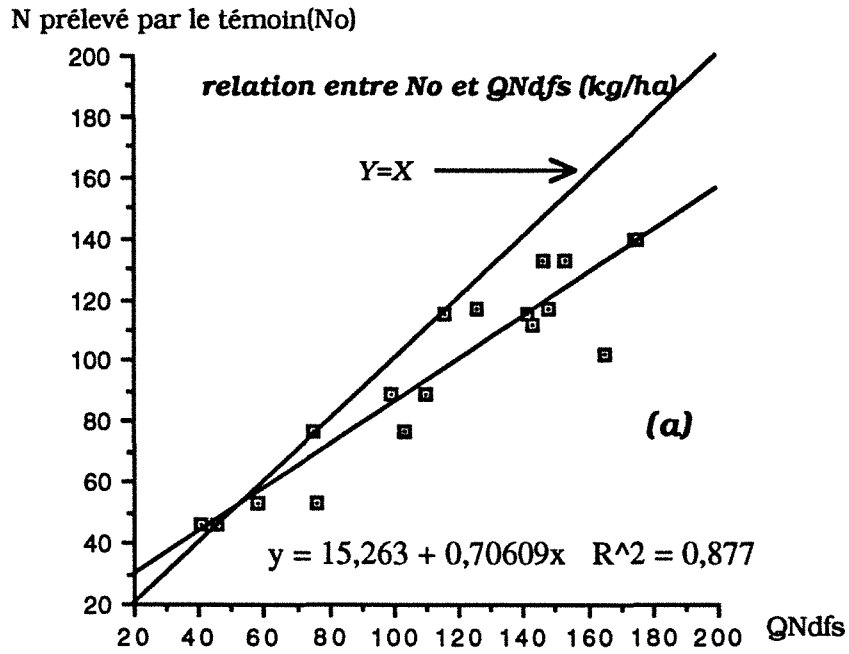


Planche 5.10 : comparaison de l'azote prélevé par le témoin non fertilisé(No) avec $QNdfs$ et la valeur A.

Rapport de Ndff et Ndfs avec les doses d'engrais azoté (dose N)

Il nous a paru intéressant de déterminer si l'apport de différentes doses de fertilisant entraîne des variations dans l'azote prélevé par les végétaux cultivés.

Rappelons d'abord la façon de calculer l'azote fourni par le fertilisant (Ndff : "nitrogen derived from fertiliser") et la fourniture en azote du sol (Ndfs : "nitrogen derived from soil") présent dans la plante. Le Ndff est calculé directement par le rapport des excès isotopiques en ^{15}N de la plante et de l'engrais et on l'exprime conventionnellement en % ; le Ndfs correspond alors à la différence $100 - \text{Ndff}$. Si nous voulons exprimer l'azote présent dans la plante provenant de ces deux sources en kg N ha^{-1} , nous devons alors établir un rapport avec l'azote prélevé par la plante (Nprél) en valeurs absolues ; ces valeurs nous les appellerons : $\text{QNdff} = (\text{Nprél})(\text{Ndff})/100$ et $\text{QNdfs} = (\text{Nprél})(\text{Ndfs})/100$ (Hauck et Bremner, 1976 ; cf. Chapitre II : méthodes analytiques).

Nous notons que l'azote prélevé par la plante est davantage corrélé avec l'azote provenant du sol (QNdfs) qu'avec l'azote provenant du fertilisant (QNdff). Néanmoins en comparant l'effet des doses d'azote sur le prélèvement d'azote par la plante, nous trouvons un $r=0,686$. Ceci indiquerait qu'il existe un faible effet de doses de N sur les fournitures d'azote par le sol, correspondant à l'effet ANI apparente (Jenkinson *et al.*, 1985 ; Azam *et al.*, 1993 ; Hamid et Ahmad, 1993) ; cependant cette ANI ne serait corrélée significativement avec aucune variable (tableau 5.19).

Néanmoins, si nous observons les rapports entre les doses d'azote engrais apporté et l'azote provenant du sol et du fertilisant prélevé par la plante (QNdfs et QNdff), on note que l'hypothèse énoncée ci-dessus, n'est pas tout-à-fait évidente ; en effet, le QNdff est bien corrélé avec les doses N ($r^2=0,822$), mais le QNdfs semble indépendant de ces doses, avec un nuage de points très dispersé donc un r^2 très faible (planche 5.11). Dans nos essais, les coefficients d'efficacité de l'azote du sol et celui de l'azote du fertilisant seront donc différents confirmant les résultats obtenus par Machet *et al.* (1987) et Recous *et al.* (1988b).

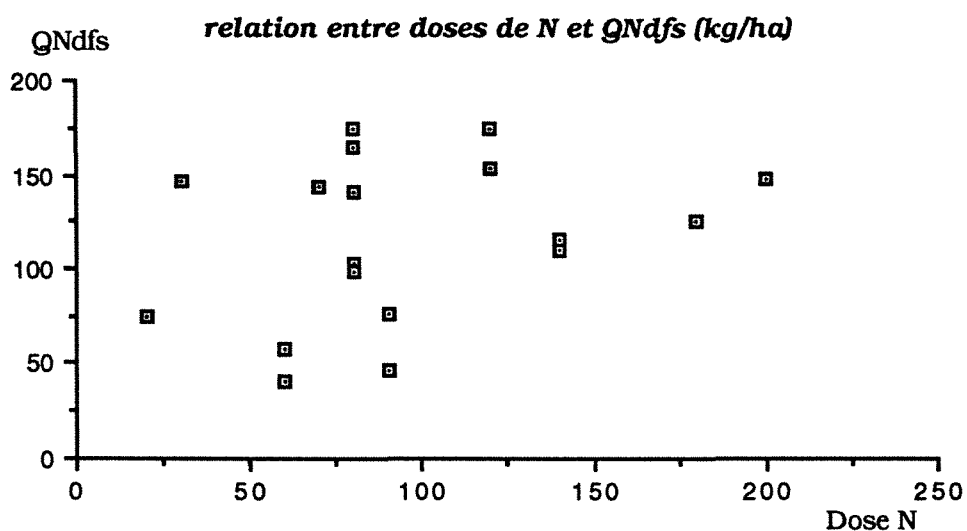
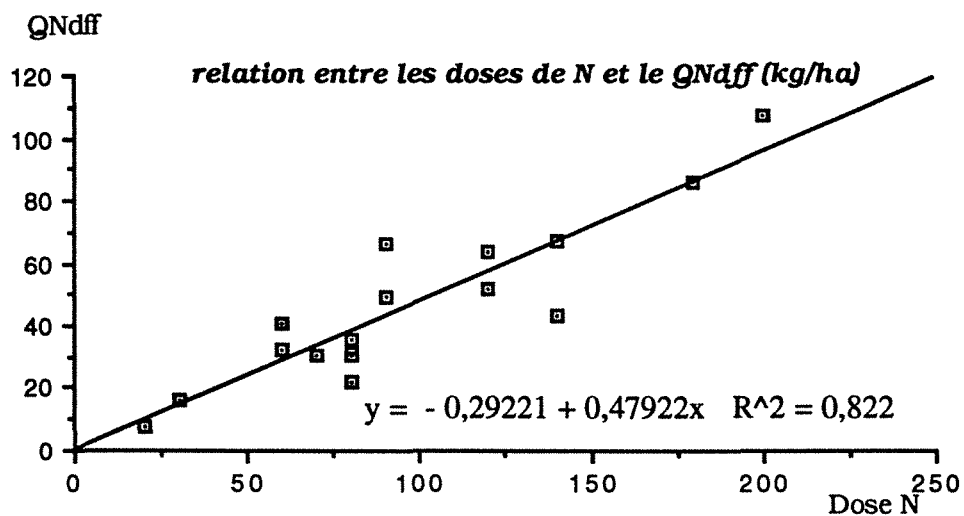


Planche 5.11 : comparaison de Ndff et Ndfs avec les doses d'azote

5.3.7. AZOTE MINÉRAL DISPONIBLE DANS LE SOL.

Azote minéral disponible à la récolte (reliquats) dans les sols français

Dans le cadre de cette étude nous essayons de lier l'aspect agronomique et l'aspect écologique, aussi il nous a paru intéressant d'étudier les reliquats d'azote minéral à la récolte. La planche 5.12 indique les variations de teneurs en azote minéral disponible dans le

sol à la récolte du maïs et les rendements pour les sites alsaciens et lorrains.

De prime abord nous remarquons une grande différence entre les reliquats des sols alsaciens et lorrains pour les traitements fertilisés comme pour le témoin sans azote ; en effet, nous constatons des valeurs très élevées des reliquats dans les sols lorrains. Ceci reflète l'importance du passé cultural des sites car la plupart des sols lorrains ont bénéficié d'apports de fumier pendant plusieurs années, tandis que les sols alsaciens n'ont reçu que des fertilisants minéraux. D'autre part il nous faut aussi souligner les différences de rendements observées et donc d'exportation d'azote minéral.

En outre une exception correspond au FLUVIOSOL de Dieulouard, lequel n'a pas reçu de fumier depuis 10 ans et montre des teneurs en N minéral très élevées à la récolte, tout en donnant lieu à des rendements très importants ; ce fait serait lié au processus d'alluvionnement auquel est soumis ce sol, du fait des crues de la Moselle ; en effet ces dernières apportent une quantité non négligeable d'alluvions qui enrichissent les teneurs en matière organique de ces sols (environ 3,5% dans la couche arable), de plus ces sols bénéficiant d'une irrigation et aussi des pluies importantes pendant l'automne (planche 5.2), présentent les conditions idéales pour la minéralisation des réserves organiques azotées comme en témoigne la faible influence des variations de la dose d'engrais sur les valeurs des reliquats à la récolte.

Pour les autres sols limoneux ou limono-sableux (FLUVIOSOL TYPIQUE de Dommartin, NEOLUVISOL de la Bouzule et CALCOSOL d'Obernai), les valeurs de l'azote disponible indiquent nettement une variation positive au delà de la dose à l'optimum de la courbe de réponse. L'azote en excès et non utilisé par la plante s'accumule alors dans les sols (Chaney, 1990 ; Machet et Mary ,1990 ; Koller, 1991) ; ces quantités sont les plus élevées dans les sols lorrains et peuvent dépasser 250 kg N ha^{-1} à la récolte.

Pour le FLUVIOSOL de Meyenheim la teneur en azote minéral est faible du fait de l'irrigation et d'un apport fractionné de l'engrais ; ces deux techniques induisant une bonne utilisation de l'azote provenant de l'engrais et du sol donc de forts rendements ; en effet on constate des CRU élevés et une forte minéralisation des réserves organiques du sol puisque les prélèvements maximaux d'azote

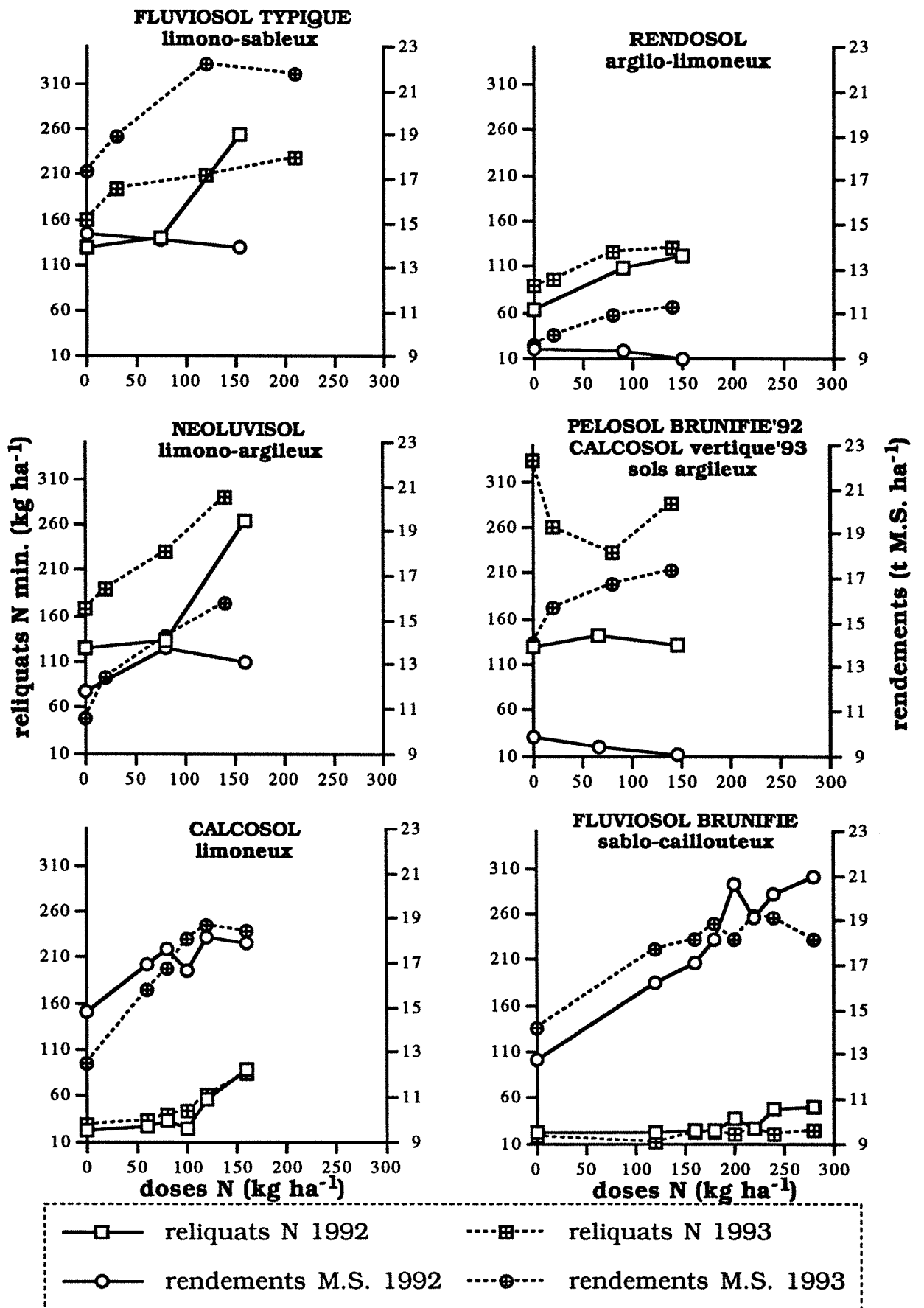


Planche 5.12 : comparaison entre les rendements et les teneurs en azote minéral dans le sol à la récolte (reliquats)

correspondent à de l'ordre de 270 kg N ha⁻¹ pour la dose X (200 kg N ha⁻¹). Il faut cependant noter que l'azote minéral mesuré en 1993 n'exclut pas une lixiviation liée à des précipitations juste avant la récolte (planche 5.2).

Pour les RENDOSOLS de Loisy et Noviant (sites 3 et 4) l'augmentation de N minéral disponible à la récolte est nette jusqu'à la dose X et les quantités se maintiennent ensuite. Notons que ce sont les sols qui présentent les plus faibles valeurs en N minéral de Lorraine, mais ceci est lié à la faible profondeur de ces sols superficiels à faible potentialité.

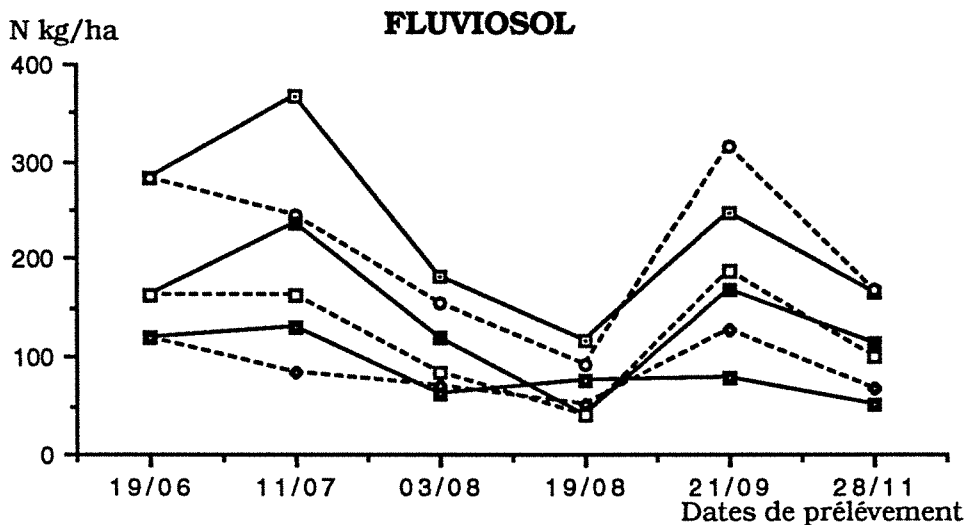
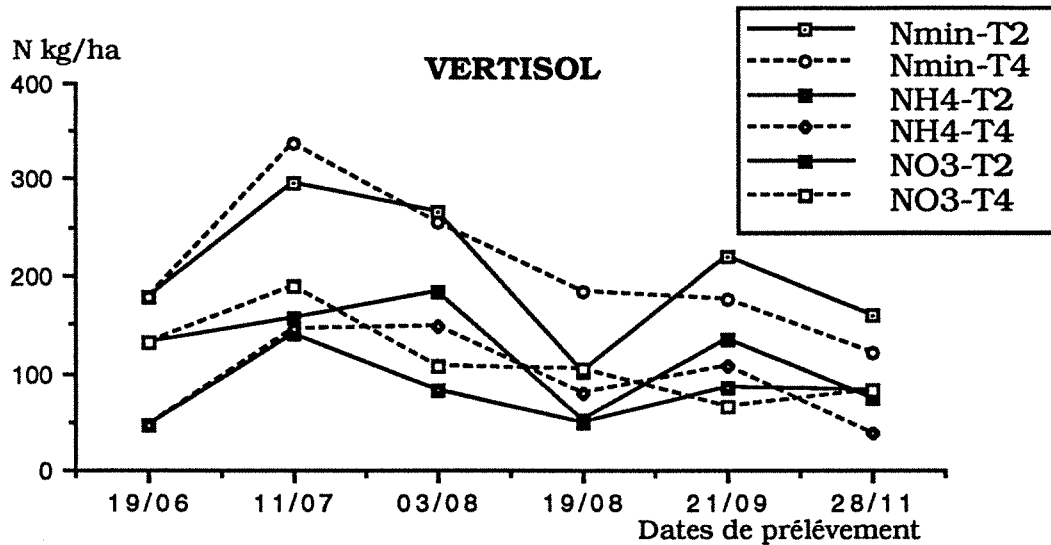
Dans le PELOSOL de la Bouzule (site 6) on observe de très faibles différences entre les reliquats du témoin 0, et les doses X et X+80 ; de plus les rendements sont relativement faibles. Pour le CALCOSOL vertique de Lagny (site 7) nous observons que malgré de meilleurs rendements obtenus par rapport à ceux du PELOSOL, les reliquats se situent parmi les plus importants rencontrés en sols lorrains, y compris pour le témoin sans azote ; dans ce sol on note une diminution des reliquats jusqu'à la dose X puis une augmentation. Dans ces deux types de sols ces variations d'azote disponible à la récolte pourraient être attribuées à un taux élevé d'immobilisation biologique microbienne (organisation de l'engrais) et à un faible potentiel de reminéralisation (Vong *et al.*, 1989 ; Chéloufi, 1991).

* * * * *

Suivi de l'azote minéral disponible dans les sols mexicains

La planche 5.13 montre les résultats de N minéral mesurés dans les deux sols mexicains pour deux traitements : la dose préconisée (T2=90 kg N ha⁻¹) et le témoin sans azote (T4). Les dosages de N minéral ont été réalisés sur 50 cm de profondeur.

Remarquons de prime abord les grandes quantités en azote minéral mesurées au début de l'expérience dans les deux sols, respectivement 178 et 284 kg N min. ha⁻¹ pour le VERTISOL et le FLUVIOSOL ; rappelons que ces deux sols ont été en jachère depuis 5 ans avec des repousses naturelles de plantes tropicales ; celles-ci ont été incorporées aux sols à la fin de la saison sèche, soit 20 jours avant le semis du maïs ; cette incorporation des engrais verts a permis une augmentation de matière organique fraîche et une



- 19/06 : avant premier apport de N (2-3 feuilles)
- 11/07 : avant deuxième apport de N (7-8 feuilles)
- 21/09 : récolte du maïs
- 28/11 : avant le cycle d'hiver

Planche 5.13 : suivi de l'azote minéral du sol dans les essais du Mexique sur maïs grain

explosion de la minéralisation des réserves organiques des sols au début de la saison des pluies (planche 5.2) ; des résultats similaires ont été constatés dans les sols de la même région par Gliessman (1982) et pour des sols ferrugineux du Sénégal par Pieri (1989). De plus la vitesse du processus d'organisation-minéralisation est élevée dans des sols tropicaux biochimiquement riches et non acides ; ceci

permet d'avoir la participation des deux formes d'azote minéral (NO_3 et NH_4) en quantités importantes pendant toute l'époque de croissance de la plante (Myers, 1975 ; Sanchez, 1976 ; Kwong *et al.*, 1986 ; Vitousek et Matson, 1988 ; Pieri, 1989 ; Guerrero *et al.*, 1990 et 1991).

Pour le VERTISOL l'allure des courbes de traitements fertilisé et témoin sont très proches, avec cependant un décrochage de la part du traitement fertilisé (T2) à la récolte (21/09/92) qui se maintient jusqu'au dernier prélèvement (différence d'environ 40 Kg N ha^{-1} en faveur du traitement fertilisé). Observant les courbes pour le NH_4 et le NO_3 , nous constatons que pour le traitement fertilisé, la forme la plus importante est NO_3 , tandis que pour le témoin les deux formes ont le même poids. Ceci met en évidence l'interaction du fertilisant avec l'azote organique du sol (effet ANI apparente).

Pour le FLUVIOSOL nous notons que le témoin (T4) présente des quantités inférieures par rapport au T2, jusqu'au prélèvement d'avant la récolte. A la récolte, le témoin contient plus de N minéral dans le sol (environ 60 Kg N ha^{-1} de plus) que le traitement 2. Dans ces sols la cinétique de NH_4 et NO_3 sont assez similaires pour les deux traitements. Nous ne pouvons pas dégager une tendance à l'augmentation de NO_3 pour le traitement fertilisé ; ceci confirme aussi nos résultats concernant l'ANI dont l'effet sur ce sol avait été négatif (tableau 5.17).

En général l'allure des courbes coïncident avec la cinétique de prélèvement d'azote par la culture (fig 5.5). En effet on observe une décroissance des teneurs en azote minéral dans le sol correspondant aux époques de prélèvement maximal par la culture. Ceci met en évidence la rapidité des cycles minéralisation-organisation dans ces sols.

Nous n'avons pu mettre en évidence la participation de l'engrais azoté quant aux reliquats azotés à la récolte pour ces sols exceptionnellement riches en N minéral; en effet, nous ne notons aucune différence significative entre le témoin et le traitement fertilisé dans les 50 premiers centimètres du profil ; cependant un risque de lixiviation peut exister pour le FLUVIOSOL.

N parties aériennes kg ha⁻¹

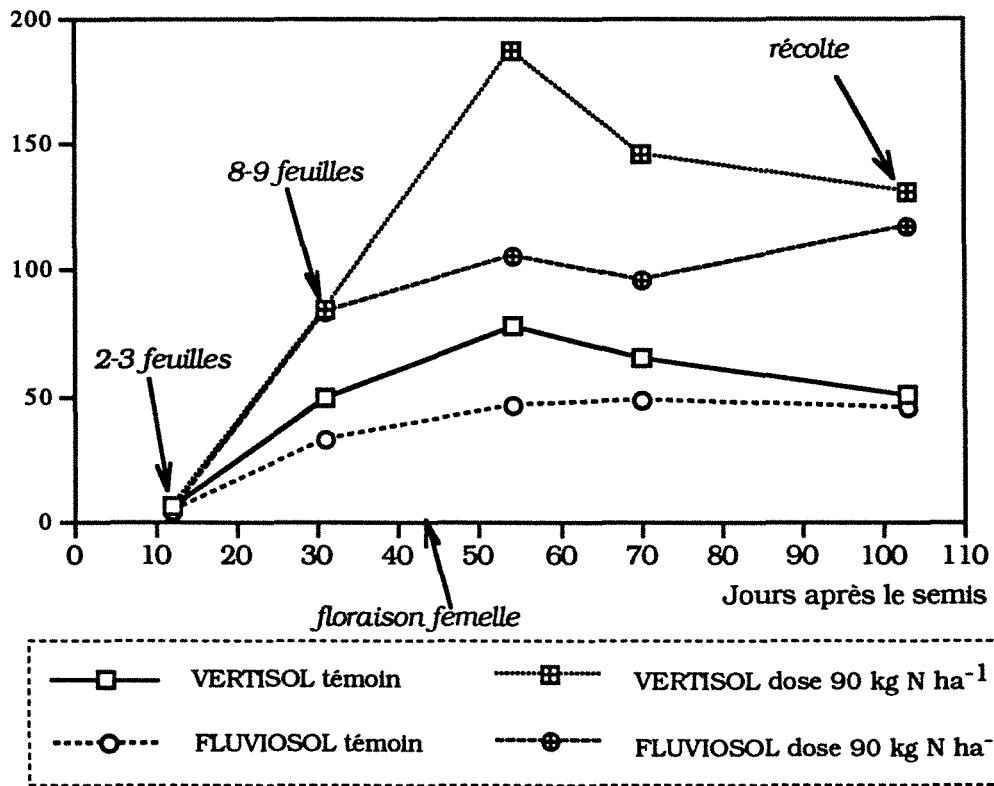


Fig 5.5 : prélèvement d'azote par le maïs dans les sols mexicains en 1992

5.4. CONCLUSIONS

Des protocoles expérimentaux sous culture de maïs ont été établis dans différents types de sols du Nord-Est de la France et dans deux sols tropicaux de la région Sud-Est du Mexique. Ces essais avaient pour but principal de déterminer les interactions sol-plante après apport de différentes doses de fertilisants azotés ; les essais français ont été suivis pendant deux campagnes culturales consécutives (1992 et 1993) ; les sols mexicains ont été suivis seulement en 1992. Les sols ont été choisis en fonction de leur classement d'aptitude culturale et de leur représentativité dans la région, ainsi nous avons choisi pour chaque région :

un sol à bonne potentialité : FLUVIOSOLS TYPIQUES pour la Lorraine (sites Dommartin et Dieulouard) et la région Sud-Est du Mexique ; CALCOSOL pour l'Alsace (site Obernai) ;

un sol à potentialité intermédiaire pour chaque région : NEOLUVISOL pour la Lorraine (site de la Bouzule), FLUVIOSOL BRUNIFIE pour l'Alsace (site Meyenheim) et VERTISOL du Sud-Est du Mexique ;

enfin nous avons choisi des sols à potentialité médiocre en Lorraine : RENDOSOLS (sites Loisy et Noviant) et PELOSOL BRUNIFIE (site de la Bouzule), ce dernier a été remplacé pour la deuxième année culturale par un CALCOSOL vertique (site Lagney), tous deux possédant les mêmes facteurs limitants (texture très argileuse et drainage déficient).

Un marquage du fertilisant (NH_4NO_3) à l'aide de ^{15}N a été pratiqué pour tous les sites afin de déterminer d'une part l'efficacité du fertilisant azoté et d'autre part les relations existantes entre cet engrais et le cycle interne de l'azote dans le sol.

* * * * *

L'analyse des réponses aux diverses doses d'ammonitrate dans les trois régions nous a permis dans la plupart des cas de confirmer l'influence des aptitudes culturales des sols sur le niveau de production agricole ; en effet les rendements obtenus pour la région Lorraine sont en accord avec la hiérarchie des classes d'aptitude des sols ; en Alsace nous avons constaté l'effet d'itinéraires techniques performants sur la potentialité agricole des sols ; ainsi le FLUVIOSOL de Meyenheim, classé à aptitude intermédiaire montre des rendements supérieurs à ceux obtenus pour les sols à meilleure

aptitude, du fait de l'utilisation de l'irrigation et du fractionnement de l'apport d'engrais. Au Mexique par contre, nous constatons un comportement contraire aux classes d'aptitude ; le VERTISOL à aptitude intermédiaire montre des rendements un peu plus importants que le FLUVIOSOL ; ceci serait lié à une déficience de précipitations en début de végétation.

Les rendements à l'optimum de la courbe de réponse ont été obtenus dans la plupart des sites français pour la dose X calculée par la méthode du bilan simplifiée. Pour les sols mexicains nous avons confirmé la dose optimale de 90 kg N ha⁻¹ conseillée dans la région pour le maïs grain.

Considérant les prélèvements d'azote par la plante à la récolte, nous constatons un enrichissement en azote du maïs avec l'augmentation de la dose d'apport, même s'il n'y a pas de réponse à l'engrais azoté et ceci en liaison avec les classes d'aptitude des sols.

* * * * *

Le Coefficient Apparent d'Utilisation de l'engrais azoté (CAU) présente des valeurs négligeables dans les essais où nous n'avons pas de réponse aux différentes doses d'azote. Dans les autres cas nous observons une grande variabilité des valeurs de CAU, notamment pour les doses au dessous de l'optimum ; ensuite on constate une nette décroissance en fonction de l'augmentation de la dose. Cependant si nous considérons seulement les valeurs de CAU à la dose optimale un effet type de sol semble se dégager (Limaux, 1994) ; pour les sols français les valeurs de CAU suivent la hiérarchie des classes d'aptitude des sols, avec une seule exception pour le CALCOSOL d'Obernai montrant des CAU inférieurs par rapport à sa potentialité. Les valeurs de CAU à l'optimum de la courbe de réponse sont comprises dans la fourchette de 60 et 80% (racines comprises) mentionnée par Carlotti (1992), avec une exception pour les FLUVIOSOLS de Dieulouard et Meyenheim qui présentent des CAU supérieurs à 80% vraisemblablement liés à l'effet de l'irrigation. Pour les sols mexicains, les tendances de CAU confirment celles observées pour les rendements : le sol à meilleure aptitude (FLUVIOSOL) montre des CAU inférieurs à ceux du VERTISOL, soit respectivement 79 et 88% racines comprises ; ce fait indiquerait une faible participation de l'azote provenant du sol dans la nutrition de la plante.

* * * * *

Les Coefficients Réels d'Utilisation de l'azote engrais (CRU) sont dans la plupart des cas en accord avec les valeurs signalées dans la bibliographie, soit entre 40 et 60% (racines comprises) pour des apports au semis et entre 60 et 80% pour des apports tardifs (Carlotti, 1992), ceci malgré le manque de réponse à l'engrais azoté de certains sols lorrains.

Pour les sols français, dans la plupart des cas, les valeurs optimales du CRU ont été observées pour les doses à l'optimum de la courbe de réponse.

Pour les deux sols mexicains les meilleurs CRU correspondent aux doses les plus élevées (120 kg N ha⁻¹), avec une nette différence entre le VERTISOL et le FLUVIOSOL respectivement 61 et 81%.

Les différences de CRU par rapport aux doses d'azote, sont dans la plupart des cas non significatives statistiquement, même pour des doses extrêmes.

Lorsqu'il a été effectué un apport fractionné en deux fois dans les sols mexicains nous constatons que les CRU du deuxième apport (stade 8 feuilles) ont été dans tous les cas supérieurs à ceux du premier apport (stade 2-3 feuilles).

Pour les sols lorrains l'application de la dose X au stade huit feuilles a permis des augmentations du CRU dans la plupart des cas de l'ordre de 4 à 11% du CRU obtenu pour la même dose appliquée au semis ; cependant pour l'année 1993 le NEOLUVISOL et le CALCOSOL vertique montrent des différences plus importantes, respectivement 31 et 41% mais toutes les différences ne sont pas significatives statistiquement ; notons qu'en Lorraine ces apports tardifs d'engrais ne se traduisent pas par une augmentation du rendement.

Le fractionnement de la dose d'engrais conduit à l'obtention de valeurs de CRU plus élevées, ceci dans les cas du FLUVIOSOL de Meyenheim, et du VERTISOL et du FLUVIOSOL du Mexique. De même la pratique de l'irrigation semble avoir un effet non négligeable sur les valeurs de CRU.

Lorsque nous avons répété l'expérience sans changer de site, nous avons observé une nette décroissance du CRU la deuxième année expérimentale et ceci malgré des rendements similaires ou légèrement supérieurs à ceux observés en 1992.

Les valeurs de CRU à l'optimum de la courbe de réponse sont supérieures à 50% pour les sols à bonne et moyenne potentialité. Les sols à potentialité médiocre montrent des CRU compris entre 40 et

50% pour les RENDOSOLS et s'abaissent aux environs de 30% pour les sols très argileux (PELOSOL de la Bouzule et CALCOSOL de Lagney).

* * * * *

Le calcul de la valeur A considérée comme une estimation du pouvoir alimentaire en azote du sol indique des valeurs statistiquement constantes par rapport à la dose du fertilisant azoté ; ceci est conforme à la bibliographie.

Nous remarquons des valeurs A très élevées pour le PELOSOL et le CALCOSOL vertique, vraisemblablement liées à des applications de fumiers dans ces types de sols à taux élevé d'organisation et de rythme de minéralisation lente, se traduisant par des Ndff faibles dans la plante. Les valeurs A les plus petites sont observées pour les sols tropicaux mexicains du fait de l'application du fertilisant en bande, de la faible participation des réserves organiques azotées du sol à la fourniture d'azote pour le maïs (Ganry, 1990).

En dehors de ces deux extrêmes nous remarquons un effet de l'année climatique ; en effet, pour l'année 1992 les valeurs A s'échelonnent entre 279 et 379 kg N ha⁻¹ équivalent ammonitrate, tandis que pour l'année 1993 les valeurs se situent entre 226 et 276.

Enfin pour chacune des années nous remarquons une correspondance entre les valeurs A et la potentialité des sols.

* * * * *

Nous avons mesuré l'ANI apparente (*Added Nitrogen Interaction*) Dans la plupart des sols les valeurs sont positives malgré le manque de réponse à la fertilisation azotée et les applications de fumier. D'après Jenkinson *et al.* (1985) ces valeurs d'ANI apparentes positives seraient liées à des substitutions de pools se traduisant par des CAU plus élevés que les CRU et des coefficients d'efficacité Ndff et Ndfs indépendants. Remarquons cependant le cas des FLUVIOSOLS de Dommartin et du Mexique qui sont les seuls à présenter des ANI négatives quelle que soit la dose ; ceci serait lié dans le premier cas au manque de réponse à l'azote et dans le deuxième cas à une faible participation de l'azote endogène du sol à la nutrition de la plante.

Il nous faut cependant reconnaître qu'il ne nous est pas possible de dégager une liaison entre les valeurs de cette ANI et le type de sol, ni même avec les variations climatiques annuelles.

Par contre, comparant les valeurs d'ANI obtenues après apports de fertilisant au stade 8 feuilles par rapport à une fertilisation au semis, nous constatons une nette décroissance de l'ANI pour les

apports plus tardifs, ceci confirme donc que les mécanismes de substitution entre "pools" seraient plus intenses lorsque les prélèvements d'azote par la plante seraient plus faibles ; ceci révèle la compétition entre l'immobilisation biologique de la plante et celle de l'organisation par la biomasse microbienne.

* * * * *

Comparant les valeurs de CRU et de CAU obtenues pour les doses où il existe une réponse à l'engrais azoté nous remarquons que la plupart des valeurs de CAU sont plus grandes que celles du CRU (effet ANI), mais nous n'avons pas réussi à mettre en évidence une corrélation entre ces deux variables ; l'utilisation du CRU pour mesurer l'efficacité réel des fertilisants azotés reste donc nécessaire ; cependant l'utilisation des valeurs de CAU dans une formule du bilan simplifiée peut être envisagée si l'on se base sur la dose optimale de la courbe de réponse et que la fourniture de l'azote du sol est estimée pour le témoin sans azote (Limaux, 1994) ; en effet nos résultats à l'aide de ^{15}N confirment que l'azote prélevé par le témoin sans engrais (No) est bien corrélé au QNdfs et à la valeur A. L'utilisation de l'azote prélevé par le témoin comme estimation des fournitures d'azote du sol est donc tout-à-fait possible, reste à multiplier les essais pour trouver un modèle statistique permettant d'obtenir une équation pour calculer le QNdfs à partir du No.

Enfin nous avons observé dans tous nos protocoles qu'il n'existait pas de rapport entre les doses de N et le QNdfs ; par contre il existe une corrélation positive entre les diverses doses et le QNdff ($r^2=0,822$). Nous confirmons donc que les coefficients d'efficacité de Ndfs et Ndff sont différents, ce qui met en évidence la substitution entre pools entre différents compartiments azotés dans le cycle interne de l'azote. De plus nous observons que QNdfs et la valeur A sont indépendantes des doses d'azote ; autrement dit, les fournitures d'azote par le sol ne montrent pas de différences quelles que soient la dose tout en présentant des interactions (effet ANI).

* * * * *

Devant les problèmes environnementaux nous avons observé les teneurs en azote minéral disponible dans les sols. Pour les sols français les teneurs en azote ammoniacal étant faibles nous les avons regroupées avec les valeurs en azote nitrique déterminées à la récolte du maïs ; pour les sols tropicaux nous avons présenté séparément la

variation des teneurs en azote nitrique et ammoniacal et ceci pendant une saison culturale.

Pour les sols français, nos résultats confirment la nécessité de ne pas dépasser les doses optimales raisonnées pour des conditions climatiques déterminées afin de limiter les risques d'entraînement des nitrates ; en outre il nous faut souligner que pour des agrosystèmes lorrains où il y a une intensification fourragère avec les apports importants de fumier sur des parcelles réservées à la culture de maïs fourrage, cet apport d'azote organique entraîne des risques élevés de lixiviation des nitrates, notamment pendant la période interculturelle.

En conséquence, dans les sols lorrains ayant reçu des apports de fumier en début de rotation, l'utilisation de la fertilisation azotée n'est pas toujours nécessaire et dans la plupart des cas on pourra se contenter de doses faibles et d'apports au stade 7-8 feuilles.

Pour les sols mexicains nous constatons des teneurs élevées en N minéral dans le sol tout le long du cycle cultural, avec des fluctuations en fonction des prélèvements d'azote par la plante ; cependant ces prélèvements laissent dans le sol toujours une quantité importante d'azote disponible. Ceci met en évidence l'intensité des processus de minéralisation et d'organisation en zone tropicale humide dans des sols chimiquement riches. Comme à la récolte les différences entre les témoins et les parcelles ayant reçu 90 unités d'azote ne sont pas très nettes et comme les CRU sont très élevés, il nous est difficile d'estimer les risques de lixiviation des nitrates en fonction de l'apport d'engrais.

* * * * *

En conclusion de ce chapitre il nous a paru évident d'approfondir le devenir du fertilisant azoté en conditions contrôlées dans les principaux types de sols que nous avons jusqu'alors étudiés.

CHAPITRE VI : ETUDE DES MECANISMES D'ORGANISATION ET DE MINERALISATION DES COMPARTIMENTS ORGANIQUES AZOTES DANS HUIT SOLS EN PRESENCE D'UN FERTILISANT MINERAL MARQUE ($K^{15}NO_3$)

6.1. INTRODUCTION

Le rôle des microorganismes du sol dans les transformations de la matière organique est connu depuis plus d'un siècle. Le microbiologiste Waksman a été en 1927, l'un des premiers à formuler clairement les questions pertinentes au plan agronomique : quelles sont les relations entre les activités microbiennes et la fertilité des sols ? (Chaussod et Houot, 1993). Une meilleure connaissance des transformations qui ont lieu dans la phase organique du sol est très importante pour mieux maîtriser le cycle de l'azote dans les terres agricoles (Balabane et Balesdent, 1992).

La partie du fertilisant azoté non récupérée par la plante a été considérée dans le passé comme perdue, soit par volatilisation, dénitrification ou lixiviation ; cependant, une grande partie de cet engrais peut être organisée par les microorganismes du sol (Recous *et al.*, 1992) ; ces produits de néosynthèse peuvent être aussi partiellement reminéralisés et remis en solution pour participer à la nutrition des plantes (Jacquin *et al.*, 1991).

De nombreux chercheurs ont étudié les intensités d'organisation-minéralisation à l'aide du ^{15}N apporté sous formes d'engrais minéraux ou de substrats organiques (Stewart *et al.*, 1963 ; Guiraud et Fardeau, 1977b ; Marumoto *et al.*, 1980 ; Guiraud, 1984 ; Vong, 1987 ; Recous, 1988 ; Recous *et al.*, 1988 ; Jacquin et Vong, 1990 ; Chéloufi, 1991 ; Jacquin *et al.*, 1992 ; Badiane, 1993 ; Sulce, 1993 ; Alfaia, 1993).

L'azote organisé fait donc partie d'une réserve potentiellement minéralisable ; le flux de fourniture de cet azote aux plantes est difficile à maîtriser en raison de la connaissance insuffisante des structures organiques dans lesquelles il s'intègre. D'autre part les cycles de minéralisation-organisation correspondent à des processus microbiens se déroulant simultanément suivant des mécanismes complexes (Marumoto *et al.*, 1980). De ce fait, les réserves

ponctuelles de l'azote minéral du sol (minéralisation nette) ne permettent pas d'évaluer les phénomènes bruts (minéralisation brute) ; pour évaluer ces processus bruts, c'est à dire les valeurs réelles de transferts entre les différentes formes azotées présentes dans le sol, il est indispensable d'avoir recours à des méthodes de traçage isotopique (Guiraud, 1984).

Dans ce contexte, notre étude a porté sur la couche arable de huit sols étudiés auparavant en conditions de plein champ sous culture de maïs en 1992 (chapitre V), pour y quantifier sous conditions contrôlées, l'organisation microbienne d'un engrais azoté marqué ($K^{15}NO_3$) et sa minéralisation ultérieure en présence d'un extracteur biologique, le ray-grass d'Italie. Cette étude vise à accéder à une connaissance précise de la participation respective des différents compartiments d'azote organique à la nutrition des plantes.

6.2. MATERIELS ET METHODES

6.2.1. MATERIELS

Nos essais en vases de végétation ont été réalisés sur l'horizon Ap des huit sols étudiés préalablement en plein champ sous culture de maïs dans trois régions : la Lorraine, l'Alsace et la région tropicale Sud-Est du Mexique ; les sols sont :

1) FLUVIOSOL TYPIQUE de Dommartin	Région Lorraine
2) RENDOSOL de Loisy	" "
3) NEOLUVISOL de la Bouzule	" "
4) PELOSOL BRUNIFIE de la Bouzule	" "
5) CALCOSOL d'Obernai	Région Alsace
6) FLUVIOSOL BRUNIFIE de Meyenheim	" "
7) VERTISOL du Mexique	Région tropicale
8) FLUVIOSOL TYPIQUE du Mexique	du Mexique

Leur classification complète apparaît dans les tableaux 5.2, 5.3 et 5.4 (chapitre V) et les caractéristiques physico-chimiques de leur couche arable dans le tableau 6.1. Leur description complète se trouve en annexes II-1 à II-9.

Tableau 6.1 : caractéristiques de l'horizon cultivé des sols utilisés

SOLS	Argile %	Limon %	Sable %	pH eau	C %	N ‰	C/N	M.O. %	C.E.C. meq/100g	S/T %	CaCO ₃ actif %
1	21,0	30,2	48,8	6,8	1,33	1,54	8,6	2,3	12,8	Sat.	0
2	29,1	29,7	41,2	7,9	2,27	2,20	10,3	3,9	14,2	Sat.	4,5
3	26,0	52,1	21,9	6,6	1,50	1,82	8,2	2,6	13,7	95	0
4	54,2	40,5	5,3	7,0	2,50	2,55	9,8	4,3	18,4	Sat.	0
5	29,4	61,8	6,6	8,2	1,28	1,52	8,4	2,2	16,2	Sat.	2,4
6	13,2	24,6	60,7	7,2	0,76	0,89	8,5	1,3	6,3	Sat.	0,3
7	31,0	44,0	25,0	6,5	1,06	1,07	9,9	1,8	27,8	95	0
8	19,0	13,0	68,0	5,6	1,50	1,62	9,3	2,6	11,9	74	0

- 1) FLUVIOSOL TYPIQUE de Dommartin
- 2) RENDOSOL de Loisy
- 3) NEOLUVISOL de la Bouzule
- 4) PELOSOL BRUNIFIE de la Bouzule
- 5) CALCOSOL d'Obernai
- 6) FLUVIOSOL BRUNIFIE de Meyenheim
- 7) VERTISOL du Mexique
- 8) FLUVIOSOL TYPIQUE du Mexique

6.2.2. METHODES

6.2.2.1. Protocole d'étude

Les échantillons, séchés à l'air et tamisés à 2 mm, ont été mis dans des pots en polyéthylène non drainés de 8,5 cm de haut et 9 cm de diamètre à raison de 300 g de sol par pot et de sept pots pour chaque sol. Une quantité de 70 mg N kg⁻¹ de sol a été apporté sous forme de K¹⁵NO₃ avec un excès isotopique de 29,3%. L'humidité de chaque sol a été ajustée à 80% de la capacité au champ pendant toute la durée de l'expérience. Ensuite les pots ont été mis à incuber en chambre noire thermostatée à 28°C ± 2°C pendant un mois. En parallèle nous avons mis à incuber 3 pots de chaque sol sans apport d'engrais azoté qui ont été utilisés comme témoins.

A l'issue de l'incubation l'azote minéral contenu dans chaque pot a été extrait avec 700 ml de CaCl₂ 0,01M par agitation pendant 30 minutes puis séparé du sol par filtration. Afin d'éliminer la totalité de N minéral, plusieurs rinçages ont été effectués ; on ajuste ensuite le volume final du filtrat à 1000 ml avec la même solution d'extraction et l'on prend une aliquote de 300 ml pour y doser l'azote minéral. Le sol de deux de ces pots a été séché à l'air puis stocké à 4°C en vue d'analyses chimiques ultérieures. Les trois pots témoins ont également été stockés.

Les cinq pots restant débarrassés de la fraction minérale ont été séchés et remis avec soin dans les pots en vue d'une reprise immédiate des essais en vases de végétation avec du ray-grass d'Italie (*Lolium Italicum* L.) à raison de 600 mg de semence par pot en conditions contrôlées dans une chambre écotronique.

Du fait que 3 de nos sols avaient déjà été étudiés en vases de végétation avec le même protocole mais en utilisant (1⁵NH₄)₂SO₄ comme fertilisant (Chéloufi, 1991), nous avons pris la décision de ne pas refaire la deuxième partie de la manipulation, soit la croissance du ray-grass ; les trois sols éliminés dans cette deuxième partie sont : le RENDOSOL de Loisy, le NEOLUVISOL de la Bouzule et le PELOSOL de la Bouzule.

Les cinq sols restant ont été mis en conditions de croissance des végétaux comme suit : éclairement 14h jour (12.000 Lux) et 10h nuit. Les températures sont respectivement de 28°C ± 2°C et 22°C ± 2°C ; l'humidité de l'air est de 70%.

Pour conserver l'humidité du sol, fixée à 80% de la capacité au champ, nous avons arrosé journalièrement les pots. Par la suite, nous avons procédé à trois coupes successives de la plante-test espacées de trois semaines.

A la fin des trois coupes et après enlèvement des racines, les sols ont été séchés à l'air et stockés à 4°C pour leurs analyses ultérieures. Les végétaux ont été séchés à l'étuve à 65°C, puis stockés.

6.2.2.2. Méthodes analytiques

* L'azote minéral extrait par CaCl_2 0,01M a été dosé par distillation en présence de MgO pour déplacer les ions NH_4^+ et en présence d'alliage de DEVARDA pour réduire les ions NO_2^- et NO_3^- (Bremner, 1965).

* L'azote organique pour les végétaux a été déterminé par minéralisation KJELDAHL (Guiraud et Fardeau, 1977a).

* Les différentes fractions organiques azotées ont été déterminées sur une quantité de sol frais équivalent à 10 g de sol sec préalablement débarrassé de N minéral. La méthode utilisée correspond à une technique proposée par Stewart *et al.* (1963) : il s'agit d'une hydrolyse sous reflux continu avec 100 ml de HCl 6N pendant 16h (Bremner, 1965). Après refroidissement, le mélange est filtré sur filtre de cellulose ; le résidu est rincé par de l'eau distillée et les eaux de rinçage sont ajoutées au filtrat qu'on ajuste au volume final de 200 ml. On dispose alors de la solution contenant l'azote hydrolysable total et d'un résidu qui est séché à l'air.

- Par minéralisation d'une aliquote de l'hydrolysate acide selon la méthode proposée par Guiraud et Fardeau (1977a), on obtient l'azote hydrolysable total (NHT).

- Par distillation directe d'une aliquote du filtrat (10 ml) en présence de NaOH 10N (10 ml) et piégeage dans H_2SO_4 0,01N (10 ml) on obtient, après titrimétrie par NaOH 0,01N, la fraction soluble dans l'acide et distillable, fraction dénommée (NSAD).

- Quant à la fraction dite soluble dans l'acide et non distillable ou NSAnD, elle correspond à la différence entre l'azote hydrolysable total et la fraction NSAD.

- Pour l'azote non hydrolysable (NnH) et l'azote total on les obtient par minéralisation selon la méthode utilisée pour déterminer l'azote hydrolysable total.

* Les mesures des abondances en ^{15}N ont été effectuées à l'aide du spectromètre d'émission SOPRA GS1 après conversion de l'azote ammoniacal en N_2 par la méthode de DUMAS (Fiedler et Proksch, 1975 ; Martin *et al.*, 1981) et sous forme élémentaire au moyen d'un spectromètre de masse au laboratoire du CNRS de Lyon.

6.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

En fonction des objectifs multiples de cette thèse nous ne discuterons pas les résultats en fonction des excès isotopiques dosés : ceux-ci sont seulement mentionnés dans l'annexe II-15.

6.3.1. STATUT GENERAL DU ^{15}N APRES INCUBATION

Le tableau 6.2 montre la distribution du ^{15}N après un mois d'incubation dans les huit sols étudiés, pour les traitements témoins et fertilisés. Le taux d'organisation de l'azote engrais dans ces sols s'étale entre 11 et 19,4% de l'apport initial. Une grande partie de l'azote apporté comme engrais a été mesurée en fin d'incubation ; les valeurs varient entre 60 et 93%. Il faut préciser que ces valeurs ne peuvent être considérées que comme des valeurs approchées ; en effet, il est admis que l'emploi des isotopes malgré l'intérêt de cet indicateur laisse néanmoins une marge d'imprécision.

Les défauts de bilan calculés par différence et que nous considérons comme assimilables aux pertes sont faibles pour la plupart des sols (entre 6,9 et 17,2%) exception faite du RENDOSOL de Loisy et du NEOLUVISOL de la Bouzule qui montrent des pertes respectivement de 25,7 et 38,6%. Les pertes les plus faibles ont été constatées pour les FLUVIOSOLS du Mexique et de Dommartin avec respectivement 6,9 et 12,3% (Fig 6.1).

Pour essayer d'expliquer l'origine possible de cet azote perdu, nous avons calculé leurs valeurs d'excès isotopiques d'après la formule proposée par Guiraud (1984), soit :

$$Ep\% = \frac{^{15}\text{N}}{P} \times 100 \quad (1)$$

avec : Ep% : excès isotopique des pertes

^{15}N : quantité de ^{15}N des pertes

P : quantité totale d'azote des pertes (QN pertes)

Cette perte (P) correspond à la différence entre la quantité totale d'azote provenant du compartiment minéral ou fuite (OT) et celle de l'organisation brute (OB) ; celle-ci englobant à la fois les organisations par voies microbienne et physico-chimique.

$$P = OT - OB \quad (2)$$

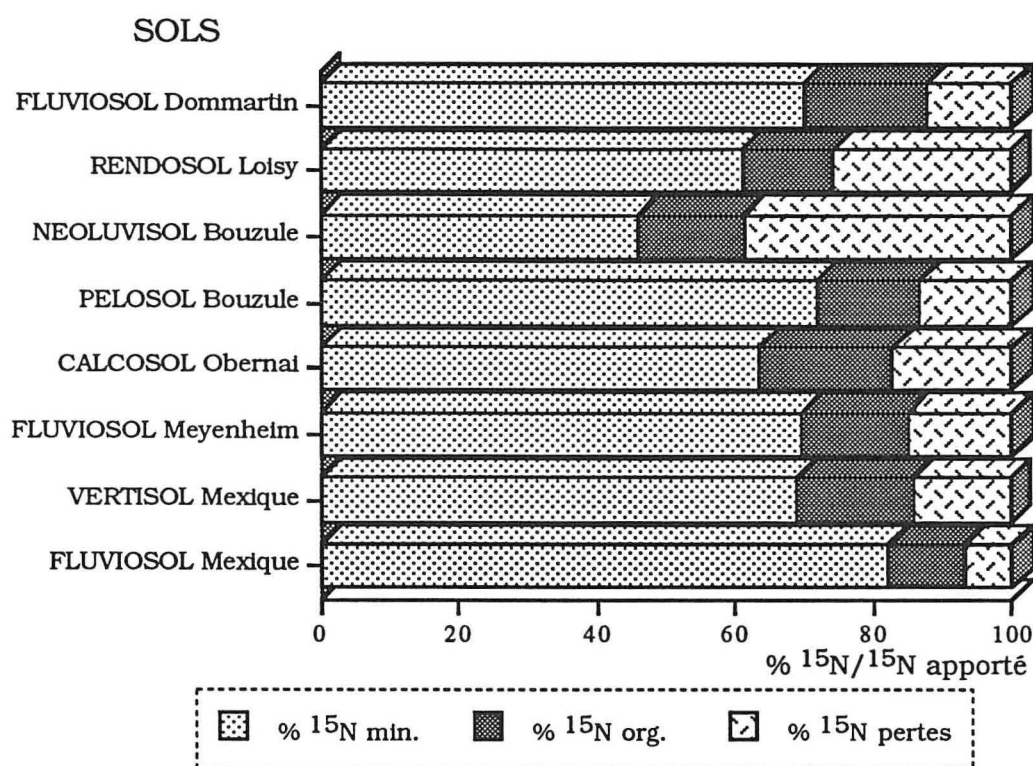


Fig 6.1 : distribution de l'azote engrais après un mois d'incubation

Il faut donc, au préalable déterminer OT ; d'après Guiraud (1984), cette valeur est calculée en tenant compte de deux hypothèses :

a) variation linéaire de l'excès isotopique de l'azote minéral en fonction du temps entre deux périodes d'analyse ;

b) reminéralisation négligeable du ^{15}N organisé entre ces deux périodes.

Le calcul de OT pour deux intervalles de temps est lié à la quantification de la disponibilité de ^{15}N minéral entre ces deux intervalles :

$$\text{OT} = \frac{(\text{QNo} \times \text{Eo}) - (\text{Qnf} \times \text{Ef})}{(\text{Eo} + \text{Ef}) / 2} \quad (3)$$

avec : QNo et Qnf : quantités initiales et finales d'azote minéral
Eo et Ef : excès isotopiques initiaux et finaux de cet azote minéral.

Tableau 6.2 : distribution de N et ^{15}N après 1 mois d'incubation

SOL	Témoin		Traitement fertilisé 70 mg N kg ⁻¹ sol					
	N min.	N org.	N min.	QN ¹⁵ min.	N org.	QN ¹⁵ org.	QN ¹⁵ total	N Pertes
1) FLUVIOSOL Dommartin	45,9	1330	110,2	14,33 (69,9)*	1579,6	3,65 (17,8)	17,98 (87,7)	2,53 (12,3)
2) RENDOSOL Loisy	54,5	1900	99,6	12,51 (60,9)	2143,1	2,73 (13,3)	15,24 (74,3)	5,27 (25,7)
3) NEOLUVI- SOL Bouzule	44,3	1570	65,6	9,42 (45,9)	1978,0	3,18 (15,5)	12,6 (61,4)	7,91 (38,6)
4) PELOSOL Bouzule	38,2	1770	96,2	14,72 (71,8)	1996,6	3,08 (15,0)	17,8 (86,8)	2,71 (13,2)
5) CALCOSOL Obernai	32,3	1300	86,6	13,02 (63,5)	1602,6	3,97 (19,4)	16,99 (82,8)	3,52 (17,2)
6) FLUVIOSOL Meyenheim	34,1	1000	93,2	14,25 (69,5)	1201,6	3,17 (15,5)	17,42 (84,9)	3,09 (15,1)
7) VERTISOL Mexique	33,0	1070	98,6	14,11 (68,8)	1092,6	3,52 (17,1)	17,63 (86,0)	2,88 (14,0)
8) FLUVIOSOL Mexique	44,8	1500	115,3	16,84 (82,1)	1649,1	2,26 (11,0)	19,1 (93,1)	1,41 (6,9)

* Valeur en pourcentage de l'apport ^{15}N comme fertilisant soit : 70 mg N kg⁻¹ sol x 29,3 (E%) = 20,51 mg ^{15}N kg⁻¹ sol.

Le calcul de l'organisation brute (OB) nécessite la connaissance de la quantité de ^{15}N réellement organisée dans le sol. En reprenant les deux mêmes hypothèses on obtient :

$$OB = \left(\frac{Q^{15}N \text{ organisé}}{(E_o + E_f) / 2} \right) \times 100 \quad (4)$$

$Q^{15}N$ organisé : quantité de ^{15}N organisé en fin d'incubation

A partir de la formule (2) on peut donc calculer (P) qui permettra de calculer ensuite son excès isotopique ($E_p\%$) en utilisant la formule 1.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 6.3. Même si les valeurs de l'excès isotopique des pertes avoisines celles de l'excès isotopique moyen de l'azote minéral il n'est pas prouvé que ces pertes soient exclusivement d'origine minérale. Toutefois Chéloufi, 1991 ; Badiane, 1993 et Sulce, 1993 pensent qu'elles peuvent être produites par dénitrification.

6.3.1.1. Statut du N minéral après incubation

Les résultats concernent les formes d'azote minéral pour l'état initial (avant incubation) et pour les traitements témoin et fertilisé après un mois d'incubation sont présentés dans le tableau 6.4. Notons qu'à l'état initial la forme $N-NH_4$ était présente en quantités importantes ; en fin d'incubation cette forme est négligeable dans le traitement témoin et peu élevée dans le traitement fertilisé (planche 6.1) ; dans ce dernier traitement cette forme est essentiellement originaire du sol (elle ne représente que des valeurs négligeables de l'apport initial d'engrais azoté marqué). Ceci témoigne des processus de nitrification et organisation présentés par tous les sols ; la forme $N-NO_3$ est donc largement dominante en fin d'incubation ; ce fait a déjà été constaté par d'autres chercheurs (Wickramasinghe *et al.*, 1985 ; Shen *et al.*, 1989 ; Recous *et al.*, 1990 ; Destain *et al.*, 1991 ; Jacquin *et al.*, 1991 ; Chéloufi, 1991 ; Azam *et al.*, 1993 ; Sulce, 1993).

Comparant ces données pour chaque type de sol (planche 6.1), nous ne constatons pas de relations nettes entre types de sols et teneurs en N minéral. Notons cependant les grandes augmentations constatées pour les traitements témoin et fertilisé des FLUVIOSOLS de Dommartin et du Mexique, ainsi que du RENDOSOL de Loisy et du PELOSOL de la Bouzule. Par contre, on note de plus faibles augmentations pour le NEOLUVISOL, le CALCOSOL et le FLUVIOSOL

Tableau 6.3 : calcul de l'excès isotopique des pertes brutes au cours de l'incubation*

Indexes	1) FLUVIOSOL Dommarin		2) RENDOSOL Loisy		3) NEOLUVISOL Bouzule		4) PELOSOL Bouzule		5) CALCOSOL Obernal		6) FLUVISOL Meyenheim		7) VERTISOL Mexique		8) FLUVIOSOL Mexique	
	dé- part	fi- nal	dé- part	fi- nal	dé- part	fi- nal	dé- part	fi- nal	dé- part	fi- nal	dé- part	fi- nal	dé- part	fi- nal	dé- part	fi- nal
QN minéral	96	110	110	100	108	66	93	96	97	87	103	93	97	99	99	115
E%	21,4	13,0	18,6	12,5	19,0	14,2	22,0	15,3	21,1	14,9	19,9	15,4	21,1	14,2	20,7	14,6
¹⁵ N min.	20,5	14,3	20,5	12,5	20,5	9,4	20,5	14,7	20,5	13,0	20,5	14,3	20,5	14,1	20,5	16,8
E% moy.	17,2		15,6		16,6		18,7		18,0		17,7		17,7		17,7	
Δ ¹⁵ N min.	6,2		8		11,1		5,8		7,5		6,2		6,4		3,7	
OT 1)	36,1		51,3		66,9		31,0		41,7		35,0		36,2		20,9	
¹⁵ N org.	3,65		2,73		3,18		3,08		3,97		3,17		3,52		2,26	
OB 2)	21,2		17,5		19,2		16,5		22,1		17,9		19,9		12,8	
Pertes QN	14,9		33,8		47,7		14,5		19,6		17,1		16,3		8,1	
¹⁵ N	2,55		5,27		7,92		2,72		3,53		3,03		2,88		1,44	
E%	17,1		15,6		16,6		18,8		18,0		17,7		17,7		17,8	
min. nette (MN) 3)	14		-10		-42		3		-10		-10		2		16	
min. brute (MB) 4)	50,1		41,3		24,9		34		31,7		25,0		38,2		36,9	

* Valeurs en mg N kg⁻¹ sol, sauf pour les excès isotopiques qui sont exprimés en %

1) OT : quantité totale d'azote provenant du compartiment minéral ou fuite

2) OB : organisation brute

3) minéralisation nette : QN minéral final - QN minéral départ

4) minéralisation brute : OT + MN

Tableau 6.4 : distribution des formes de l'azote minéral après un mois d'incubation en mg N kg⁻¹ de sol

Sol	Etat initial			Témoin			Traitement fertilisé 70 mg kg ⁻¹ sol					
	N-NO ₃	N-NH ₄	N min	N-NO ₃	N-NH ₄	N min	N-NO ₃	¹⁵ N-NO ₃	N-NH ₄	¹⁵ N-NH ₄	N min	¹⁵ N min
1) FLUVIOSOL Dommartin	6,7	19,2	25,9	45,9	0	45,9	106,2	14,3 (69,7)*	4,0	0,03 (0,2)	110,2	14,33 (69,9)
2) RENDOSOL Loisy	20,2	20,0	40,2	54,5	0	54,5	96,6	12,5 (60,9)	3,0	0,01 (nég.)	99,6	12,51 (60,9)
3) NEOLUVISOL Bouzule	22,5	15,8	38,3	44,0	0,3	44,3	64,8	9,4 (45,8)	0,8	0,02 (0,1)	65,6	9,42 (45,9)
4) PELOSOL Bouzule	7,7	15,7	23,4	38,2	0	38,2	93,2	14,7 (71,7)	3,0	0,02 (0,1)	96,2	14,72 (71,8)
5) CALCOSOL Obernai	11,2	16,3	27,3	30,7	1,6	32,3	84,5	13,0 (63,4)	2,1	0,02 (0,1)	86,6	13,02 (63,5)
6) FLUVIOSOL Meyenheim	16,2	16,4	32,6	34,1	0	34,1	88,6	14,2 (69,2)	4,6	0,05 (0,3)	93,2	14,25 (69,5)
7) VERTISOL Mexique	8,7	18,0	26,7	31,5	1,5	33,0	96,7	14,1 (68,0)	1,9	0,01 (nég.)	98,6	14,11 (68,8)
8) FLUVIOSOL Mexique	14,6	14,7	29,3	44,6	0,2	44,8	113,0	16,8 (81,9)	2,3	0,04 (0,2)	115,3	16,84 (82,1)

* Valeur en pourcentage de l'apport ¹⁵N comme fertilisant soit : 70 mg N kg⁻¹ sol x 29,3 (E%) = 20,51 mg ¹⁵N kg⁻¹ sol

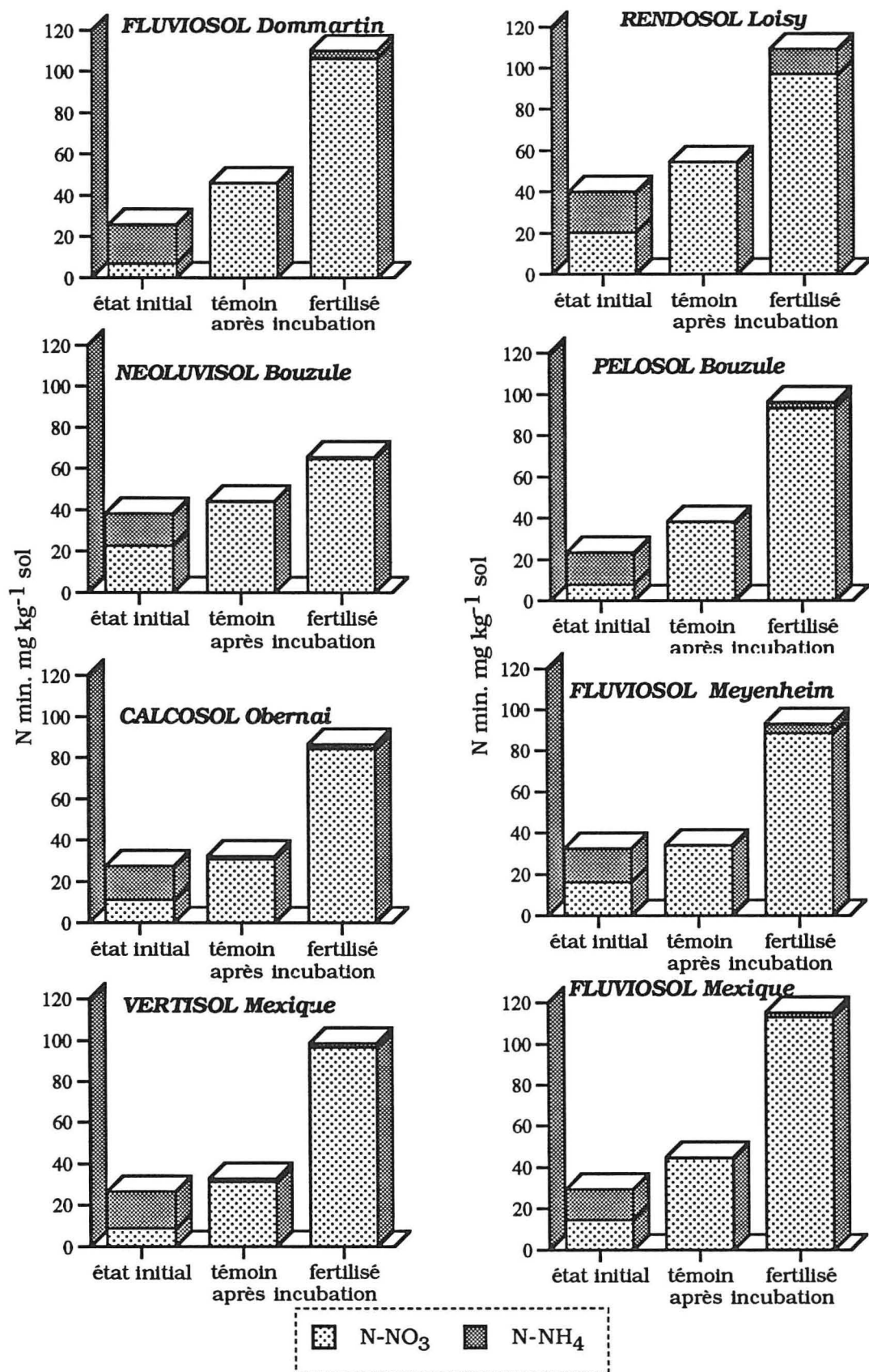


Planche 6.1 : distribution des formes de N minéral avant et après un mois d'incubation

de Meyenheim, surtout entre le témoin après incubation et l'état initial.

Dans le tableau 6.5 nous présentons les transformations dans le compartiment minéral azoté de nos sols après un mois d'incubation. La minéralisation nette (MN) des sols témoins est très variable ; montrant les valeurs les plus élevées pour les FLUVIOSOLS de Dommartin et du Mexique avec respectivement 20 et 16 mg kg⁻¹ sol. Rappelons que ces deux sols présentent une bonne aptitude culturale et sont de texture sablo-limoneuses. Ensuite le RENDOSOL de Loisy et le PELOSOL de la Bouzule montrent une MN de 15 mg N kg⁻¹ sol ; ces deux sols ont une aptitude culturale plutôt médiocre, mais avec des teneurs en matière organique proches (respectivement 3,9 et 4,3% : tableau 6.1). Le CALCOSOL, le NEOLUVISOL et le VERTISOL présentent des valeurs de MN équivalentes (de 5 à 6), les deux derniers sont classés à aptitude culturale intermédiaire et le premier à bonne aptitude ; cependant les teneurs en argile du premier horizon se situent entre 26 et 31% et les teneurs en matière organique entre 1,8 et 2,6%. Enfin le sol à plus faible teneur en argile (13,2%) et en matière organique (1,3%), le FLUVIOSOL de Meyenheim, montre une MN presque négligeable (1 mg N kg⁻¹ sol).

Pour le traitement fertilisé, la minéralisation nette (MN) calculée par la méthode proposée par Guiraud (1984), est dans la moitié des sols négative : RENDOSOL, NEOLUVISOL, CALCOSOL et FLUVIOSOL de Meyenheim ; notons que ces sols ont montré aussi les pertes les plus importantes (fig 6.1). Les FLUVIOSOLS de Dommartin et du Mexique montrent à nouveau les valeurs de MN les plus importantes (respectivement 14 et 16 mg N kg⁻¹ sol) ; rappelons que ces deux sols sont classés à bonne aptitude culturale et qu'ils ont présenté les pertes les plus faibles pendant l'incubation (fig 6.1). Enfin les deux sols argileux : le PELOSOL et le VERTISOL, montrent de faibles valeurs de MN (respectivement 3 et 2).

La minéralisation brute (MB) qui considère l'azote minéral perdu ou "fuite" du système (Guiraud, 1984), montre des valeurs plus importantes et toujours positives. Les valeurs les plus élevées sont constatées pour le FLUVIOSOL de Dommartin et le RENDOSOL (respectivement 50,1 et 41,3 mg N kg⁻¹ sol) ; ensuite les deux sols mexicains indiquent des MB de 36,9 et 38,2 respectivement pour le FLUVIOSOL et le VERTISOL. Le CALCOSOL et le PELOSOL montrent

des MB de 31,7 et 34 et finalement les plus faibles valeurs de MB sont constatées pour le NEOLUVISOL et le FLUVIOSOL de Meyenheim, environ 25 mg N kg⁻¹ sol (tableau 6.5). Nous constatons que ces valeurs de MB sont hiérarchiquement plus en conformité avec la MN des sols témoins qu'avec celles des traitements fertilisés.

L'effet ANI

Nous avons donc comparé les valeurs de la minéralisation nette pour les traitements fertilisé et témoin, afin de calculer une valeur estimant la différence réelle de minéralisation de l'azote endogène du sol provoqué par l'apport d'engrais, cette valeur est appelée "*priming effect*" ou "*ANI : Added Nitrogen Interaction*" réelle (Wickramasinghe *et al.*, 1985 ; Jenkinson *et al.*, 1985), elle est calculée par la différence entre MN du traitement fertilisé et MN du témoin sans azote.

Nous observons que toutes les valeurs obtenues sont négatives ou nulles (tableau 6.5). Par contre si nous calculons une autre valeur d'ANI, cette fois-ci par la différence entre l'azote minéral provenant du sol dans le traitement fertilisé en mg N kg⁻¹ sol (QNd_{fs}) et l'azote minéral présent dans le traitement témoin à la fin de l'incubation (Q_N min témoin), nous constatons pour presque tous les sols des valeurs positives, sauf le NEOLUVISOL qui présente une valeur négative ; cette façon de calculer l'ANI est proposée par Azam *et al.* (1993) ; ces auteurs considèrent que l'ANI calculée par cette méthode est une ANI apparente. Nos résultats sont en accord avec plusieurs auteurs qui démontrent que dans la plupart des cas nous ne constatons pas d'ANI réelles ou bien elles sont très faibles (Sorensen, 1982 ; Jenkinson *et al.*, 1985 ; Wickramasinghe *et al.*, 1985 ; Recous *et al.* 1988b ; Azam *et al.*, 1991 et 1993).

Ces ANI apparentes sont relativement liées aux potentialités des sols car ce sont les sols à aptitude bonne ou intermédiaire qui montrent les valeurs les plus importantes, les sols médiocres présentant des valeurs faibles : 7,9 et 2,1 mg N kg⁻¹ sol respectivement pour le PELOSOL et le RENDOSOL. Enfin le NEOLUVISOL montre des valeurs négatives liées aux faibles taux de matière organique donc QNd_{fs} faible et aux pertes importantes à la fin de l'incubation (tableaux 6.1 et 6.5 ; fig 6.1 ; planche 6.1).

Cet effet ANI représente pour les meilleurs sols entre 27 et 54% de l'azote minéral disponible dans le témoin ; pour les sols à plus faible potentialité ceci représente entre 3,8 et 20,9%. Nous confirmons donc que l'effet ANI apparente peut représenter une partie non négligeable des fournitures des sols (tableau 6.5).

Comparant ces valeurs d'ANI apparente avec les valeurs absolues de l'azote engrais organisé (tableaux 6.2 et 6.5), nous observons que pour le RENDOSOL, le PELOSOL, le CALCOSOL et le FLUVIOSOL de Meyenheim, les valeurs d'ANI sont soit inférieures ou égales à celles de l'azote engrais organisé. Ce cas de figure démontre que l'ANI apparente est bien due à un effet de substitution de "pools" ; en effet, l'azote engrais apporté a pris la place de l'azote minéral du sol au moment de l'organisation du QNdfs du "pool" minéral des sols (Wickramasinghe *et al.*, 1985 ; Jenkinson *et al.*, 1985 ; Hart *et al.*, 1986 ; Azam *et al.*, 1993 ; Hamid et Ahmad, 1993).

Par contre le FLUVIOSOL de Dommartin et surtout le VERTISOL et le FLUVIOSOL du Mexique montrent des valeurs d'ANI apparente supérieures à celles de l'azote engrais organisé (tableau 6.5). Dans ce cas la substitution de "pools" par l'organisation de l'azote engrais n'explique pas toute l'ANI. La substitution de "pools" au cours de la dénitrification (Jenkinson *et al.*, 1985) expliquerait une autre partie de cette ANI, mais rappelons que ces sols ont présenté les taux de pertes les plus faibles, soit 6,9 à 14,0% de l'azote quinze apporté (tableau 6.2) ; ceci est corrélé avec les pH légèrement acides, soit de 5,6 à 6,8, mais aussi avec la faible organisation et la vitesse de minéralisation intense des sols tropicaux (Myers, 1975 ; Fredrickson *et al.*, 1982 ; Kee Kwong *et al.*, 1986 ; Vitousek et Matson, 1988 ; Chotte *et al.*, 1990 ; Guerrero *et al.*, 1990). Enfin certains chercheurs ont constaté des ANI apparentes dues aux réactions de déplacement des ions NH_4^+ du sol avec le K^+ du fertilisant, ce qui provoque une augmentation des ions ammonium dans la solution du sol (Broadbent et Nakashima, 1971 ; Nommik, 1981 ; Jenkinson *et al.*, 1985).

6.3.1.2 Organisation de l'azote engrais

Le tableau 6.2 et la figure 6.2 montrent les différents taux d'organisation de l'azote engrais pour les huit sols étudiés en % de l'azote quinze apporté.

Tableau 6.5 : transformations dans le compartiment minéral des sols après un mois d'incubation (valeurs en mg N kg⁻¹ sol, sauf rapport en %)

Sol	QN min	Témoins		Traitement fertilisé avec 70 mg kg ⁻¹ sol de K ¹⁵ NO ₃					ANI	ANI	ANI app./	N engrais organisé
	initial	QN min	MN	QN min	QNdf	QNdfs	MB	MN	réelle	Apparente	QN min témoin (%)	
1) FLUVIOSOL Dommartin	26	46	20	110	49,9	60,1	50,1	14	-6	14,1	30,7	12,5
2) RENDOSOL Loisy	40	55	15	100	42,9	57,1	41,3	-10	-25	2,1	3,8	9,3
3) NEOLUVISOL Bouzule	38	44	6	66	32,1	33,9	24,9	-42	-48	-10,1	-23,0	10,9
4) PELOSOL Bouzule	23	38	15	96	50,1	45,9	34,0	3	-12	7,9	20,8	10,5
5) CALCOSOL Obernai	27	32	5	87	44,5	42,5	31,7	-10	-15	10,5	32,8	13,6
6) FLUVIOSOL Meyenheim	33	34	1	93	48,7	44,3	25,0	-10	-11	10,3	30,3	10,9
7) VERTISOL Mexique	27	33	6	99	48,2	50,8	38,2	2	-4	17,8	53,9	12,0
8) FLUVIOSOL Mexique	29	45	16	115	57,5	57,5	36,9	16	0	12,5	27,8	7,7

MN : minéralisation nette : QN min final - QN min initial.

ANI réelle : MN du traitement fertilisé - MN traitement témoin (Wickramasinghe *et al.*, 1985).

ANI apparente : QNdfs traitement fertilisé - QN min témoin (Azam *et al.*, 1993).

MB : fraction OT + MN (d'après le tableau 6.3).

Analysons d'abord les sols français. Ces sols présentent des taux d'organisation de l'azote engrais variable avec la hiérarchie suivante : CALCOSOL d'Obernai 19,3%, FLUVIOSOL de Dommartin 17,8%, FLUVIOSOL de Meyenheim et NEOLUVISOL de la Bouzule 15,5% et RENDOSOL de Loisy 13,3%. Ces taux d'organisation sont liés aux classements d'aptitude culturale des sols ; en effet, les deux sols à meilleure classe présentent les plus grandes organisations, les sols à classe intermédiaire présentent tous les deux 15,5% d'organisation et les sols à classe médiocre obtiennent les plus faibles valeurs.

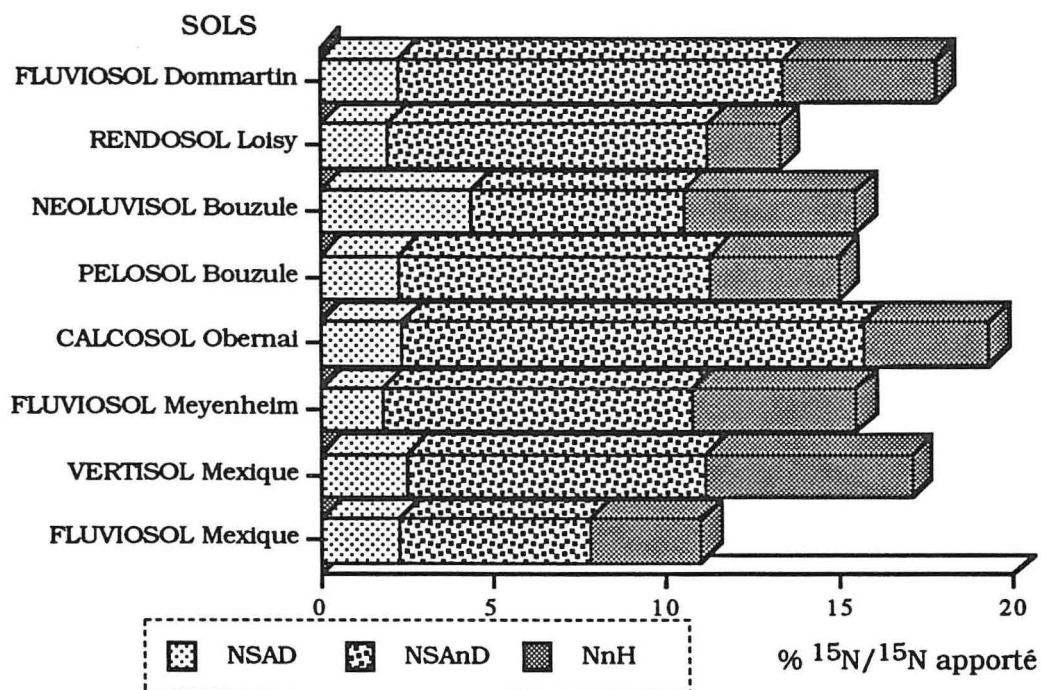


Fig 6.2 : distribution du ^{15}N dans les différentes fractions organiques après un mois d'incubation

En outre, nous ne constatons pas de relation directe entre les teneurs en argile et les taux d'organisation des sols, ce qui est en contradiction avec les conclusions d'autres chercheurs ayant trouvé que les sols argileux et limoneux organisent une plus grande quantité d'engrais que les sols sableux (Jacquin et Vong, 1990 ; Chéloufi, 1991 ; Jacquin *et al.*, 1991 ; Sulce, 1993). Par contre nous constatons une relation de l'organisation avec les taux de carbone organique ; en effet, sauf pour le cas du FLUVIOSOL de Meyenheim, les taux d'organisation sont liés de façon inverse avec les teneurs en carbone organique, en accord avec les résultats de Jacquin et Vong (1990). La relation entre le taux d'organisation et le rapport C/N

n'est pas évidente ; cependant on observe nettement que les deux sols à plus faible organisation montrent les rapports C/N les plus élevés, ceci en concordance avec les résultats de Chéloufi (1991) et Jacquin *et al.* (1991). Ces comparaisons sont présentées dans le tableau 6.6.

Tableau 6.6 : relation entre les taux d'organisation et plusieurs caractéristiques des sols

SOLS	organisation % ¹⁵ N/ ¹⁵ N apporté	% Argile	% C.O.	C/N	pH	C.O. x A/100
1) FLUVIOSOL Dommartin	17,8	21,0	1,33	8,6	6,8	0,28
2) RENDOSOL Loisy	13,3	29,1	2,27	10,3	7,9	0,66
3) NEOLUVI- SOL Bouzule	15,5	26,0	1,5	8,2	6,6	0,39
4) PELOSOL Bouzule	15,0	54,2	2,5	9,8	7,0	1,36
5) CALCOSOL Obernai	19,3	29,4	1,26	8,4	8,2	0,38
6) FLUVIOSOL Meyenheim	15,5	13,2	0,76	8,5	7,2	0,10
7) VERTISOL Mexique	17,1	31,0	1,06	9,9	6,5	0,33
8) FLUVIOSOL Mexique	11,0	19,0	1,5	9,3	5,6	0,29

Cette tendance est similaire pour le rapport C.O. x argile/100 ; nous constatons que les sols à plus faible organisation montrent les rapports les plus élevés.

Dans le cas des sols mexicains la tendance est inversée par rapport aux sols français : en effet, nous constatons une meilleure organisation pour le VERTISOL (17,1%) que pour le FLUVIOSOL (11,0%) ; de fait la plus faible organisation a été constatée dans ce dernier sol. Ces différences d'organisation sont en concordance avec

les teneurs en argile (respectivement 31 et 19%), montrant que les sols les plus argileux organisent de plus grandes quantités d'engrais (Jacquin et Vong, 1990 ; Chéloufi, 1991 ; Jacquin *et al.*, 1991 ; Sulce, 1993), et aussi avec les pH ; à pH plus faible correspond une organisation plus faible (Alfaia, 1993). Par contre nous constatons une relation négative avec les teneurs en carbone organique, le rapport C/N et le rapport C.O. x Argile/100 (tableau 6.6).

Formes de l'azote organisé

Grâce au fractionnement par hydrolyse acide de l'azote organique, selon la méthode proposée par Stewart *et al.* (1963) et modifiée par Guiraud et Fardeau (1977b), nous pouvons préciser la distribution de ^{15}N entre les constituants biochimiques des sols correspondant à trois fractions distinctes selon leur solubilité dans l'acide et leur volatilité (tableau 6.7 ; fig 6.2).

Fraction NSAnD : elle correspond à l'azote soluble dans l'acide et non distillable et représente essentiellement les amino-acides ; d'après plusieurs auteurs elle serait le siège principal des processus biologiques d'organisation-reminéralisation (Kai, 1975 ; Guiraud, 1984 ; Jacquin *et al.*, 1985 ; Vong, 1987 ; Jacquin et Vong, 1990 ; Chéloufi, 1991 ; Jacquin *et al.*, 1992 ; Sulce, 1993 ; Alfaia, 1993 ; Jacquin *et al.*, 1994). Nos résultats montrent une incorporation importante de l'azote engrais sous cette forme (fig 6.2), mais celle-ci varie en fonction du type de sol ; en effet, les pourcentages les plus élevés d'organisation sous cette forme ont été observés pour les sols calcaires : RENDOSOL de Loisy et CALCOSOL d'Obernai avec respectivement 69,2 et 68,9% du total d'azote organisé ; ensuite ce sont les FLUVIOSOLS de Dommartin et Meyenheim qui présentent respectivement 62,4 et 57,4% ; le PELOSOL indique 60% de l'azote organisé sous cette forme et le NEOLUVISOL montre les plus faibles valeurs (39,4%). Les deux sols mexicains montrent environ 50% de NSAnD (tableau 6.7).

Fraction NSAD : elle correspond à l'azote soluble dans l'acide et distillable. Cette forme essentiellement de nature ammoniacale représente une forme intermédiaire d'origines diverses (Vong, 1987), correspondant à des formes de turnover rapide (Sulce, 1993). Elle est particulièrement élevée dans le NEOLUVISOL et le FLUVIOSOL du Mexique, respectivement 28,4 et 20,9% du ^{15}N

organisé ; pour les autres sols les valeurs s'étalent entre 11,6 et 15,3%. Notons qu'à l'exception du FLUVIOSOL mexicain, cette forme montre une certaine concordance avec la texture des sols ; en effet les sols argileux et limoneux indiquent les valeurs les plus importantes tandis que les sols ayant des teneurs élevées en sable présentent des NSAD en % plus petites. Ceci met en évidence le rôle des argiles sur l'importance de cette forme d'azote organique (Chéloufi, 1991 ; Sulce, 1993). En outre le taux élevé présenté par le FLUVIOSOL du Mexique est dû au précédent cultural de ces sols soumis à jachère avant échantillonnage (tableau 6.7 ; fig 6.2).

Fraction NnH : cette forme correspond à l'azote non hydrolysable, elle est parfois qualifiée d'hétérocyclique (Flaig, 1971) et elle est incorporée au sein des polycondensats humiques (Andreux, 1978). Trois ensembles de sols peuvent être distingués : des sols ayant des valeurs de NnH en % de ^{15}N organisé supérieures à 30% (VERTISOL, NEOLUVISOL et FLUVIOSOL de Meyenheim) ; des sols ayant des valeurs de NnH comprises entre 20 et 30% (FLUVIOSOLS du Mexique et de Dommartin et PELOSOL), et finalement les sols ayant des valeurs de NnH inférieures à 20% (les deux sols calcaires CALCOSOL et RENDOSOL).

6.3.2. STATUT DU ^{15}N APRES CULTURE DE RAY-GRASS

6.3.2.1. Origines de l'azote engrais reminéralisé

L'utilisation du ray-grass d'Italie comme extracteur biologique pendant une durée de neuf semaines nous a permis de quantifier la reminéralisation du ^{15}N organisé dans les sols. Cette reminéralisation a été mise en évidence en comparant le statut organique de ^{15}N avant et après culture de ray-grass (tableau 6.7).

Rappelons que les processus de reminéralisation de trois de nos sols : RENDOSOL de Loisy, NEOLUVISOL de la Bouzule et PELOSOL de la Bouzule, avaient déjà été étudiés par Chéloufi (1991) ; pour cette raison dans cette deuxième partie de l'expérience nous nous référerons aux résultats obtenus par cet auteur.

Tableau 6.7 : distribution de ^{15}N dans les différents compartiments organiques des huit sols : statut après incubation et après culture

SOLS		Formes de N organique			
		NSAD	NSAnD	NnH	N total
1) FLUVIOSOL Dommartin	(1)	2,3	11,1	4,4	17,8
	(2)	12,9	62,4	24,7	100
	(3)	7,1	36,5	9,3	52,9
	(4)	5,8	25,9	15,4	47,1
2) RENDOSOL Loisy	(1)	2,0	9,2	2,1	13,3
	(2)	15,0	69,2	15,8	100
	(2)*	22,0	50,0	28,0	100
	(3)*	20,0	39,9	19,0	78,9
	(4)*	2,0	10,1	9,0	21,1
3) NEOLUVISOL Bouzule	(1)	4,4	6,1	5,0	15,5
	(2)	28,4	39,4	32,2	100
	(2)*	21,0	48,5	30,5	100
	(3)*	16,0	20,3	12,5	48,8
	(4)*	5,0	28,2	18,0	51,2
4) PELOSOL Bouzule	(1)	2,3	9,0	3,7	15,0
	(2)	15,3	60,0	24,7	100
	(2)*	35,5	47,5	17,0	100
	(3)*	28,4	29,5	13,4	71,3
	(4)*	7,1	18,0	3,6	28,7
5) CALCOSOL Obernai	(1)	2,4	13,3	3,6	19,3
	(2)	12,4	68,9	18,	100
	(3)	9,6	42,6	18,6	70,8
	(4)	2,8	26,3	0,1	29,2
6) FLUVIOSOL Meyenheim	(1)	1,8	8,9	4,8	15,5
	(2)	11,6	57,4	31,0	100
	(3)	6,9	31,9	23,7	62,5
	(4)	4,7	25,5	7,3	37,5
7) VERTISOL Mexique	(1)	2,5	8,6	6,0	17,1
	(2)	14,6	50,3	35,1	100
	(3)	7,4	37,5	15,0	59,9
	(4)	7,2	12,8	20,1	40,1
8) FLUVIOSOL Mexique	(1)	2,3	5,5	3,2	11,0
	(2)	20,9	50,0	29,1	100
	(3)	10,2	32,3	7,5	50,0
	(4)	10,7	17,7	21,6	50,0

(1) : % ^{15}N organisé après incubation par rapport à ^{15}N apporté

(2) : (1) ramené à 100%

(3) : % ^{15}N organisé après culture, exprimé en % ^{15}N par rapport à ^{15}N total organisé après incubation

(4) : (2) - (3)

* résultats obtenus par Chéloufi (1991)

Comparant nos résultats qualitatifs après incubation à ceux de Chéloufi, nous constatons des différences surtout dans le cas du RENDOSOL et du PELOSOL et moins évidentes dans le cas du NEOLUVISOL ; en effet, nous avons mesuré dans les premiers sols beaucoup plus d'azote organisé sous la forme de NSAnD au détriment

des autres formes, en particulier de la fraction NnH pour le RENDOSOL et de la forme NSAD pour le PELOSOL ; toutefois, nous constatons que pour nos résultats et ceux de Chéloufi, la fraction NSAnD a été largement dominante par rapport aux autres formes. L'explication de ces divergences doit être liée aux différentes formes d'engrais utilisées comme traçeur : $K^{15}NO_3$ dans notre travail et $(^{15}NH_4)_2SO_4$ dans le travail de Chéloufi (1991).

Dans le cas des sols français, nous remarquons les processus de reminéralisation les plus importants pour le NEOLUVISOL et le FLUVIOSOL de Dommartin, respectivement 51,2 et 47,1% de l'azote engrais organisé après incubation ; ensuite c'est le FLUVIOSOL de Meyenheim qui présente un taux de reminéralisation de 37,5% ; enfin le CALCOSOL d'Obernai, le PELOSOL de la Bouzule et le RENDOSOL de Loisy présentent les taux de reminéralisation les plus faibles, respectivement 29,2, 28,7 et 21,1% (tableau 6.7).

Pour les sols mexicains le FLUVIOSOL montre un taux de reminéralisation plus élevé que le VERTISOL, respectivement 50,0 et 40,1%.

Cas du NEOLUVISOL et du FLUVIOSOL de Dommartin (planche 6.2). Ces deux sols présentent les turnovers les plus intenses. Dans le cas du NEOLUVISOL les résultats de Chéloufi (1991) confirment ceux de Jacquin (1985) montrant de fortes intensités de minéralisation primaire et surtout secondaire dans ce type de mull classique, l'auteur attribue cela à l'existence d'une ambiance bio-physico-chimique optimale dans ce sol à texture équilibrée ; cette même explication peut être donnée pour le FLUVIOSOL de Dommartin. Notons que la plupart de l'azote reminéralisé provient de la fraction NSAnD, respectivement 28,2 et 25,9% pour le NEOLUVISOL et le FLUVIOSOL, comme pour la plupart des sols ; cependant une bonne quantité du surplus de reminéralisation de ces deux sols est expliquée par la fraction NnH (respectivement 18 et 15,4%) ; ceci nous permet de considérer que les structures qui résistent à l'hydrolyse acide ne correspondent pas exclusivement à de l'azote hétérocyclique (Andreux *et al.*, 1977 ; Schnitzer et Hindle, 1981), mais souvent à un mélange d'azote "non hydrolysable", mais plus biodégradable que l'azote hétérocyclique (Vong et Jacquin, 1989 ; Jacquin *et al.*, 1992 ; Sulce, 1993 ; Jacquin *et al.*, 1994).

Cas du FLUVIOSOL de Meyenheim (fig 6.3) ; dans ce sol sableux le turnover de 37,5% serait consécutif à une nature labile de l'azote

récemment organisé par la biomasse microbienne ; en effet nous assistons à une reminéralisation significative de la fraction NSAnD (25,5%), assimilée par plusieurs auteurs à la biomasse microbienne (Vong *et al.*, 1989 ; Sulce, 1993 ; Jacquin *et al.*, 1994). La participation des fractions NnH et NSAD ne sont pas non plus négligeables (respectivement 7,3 et 4,7%). Dans ce type de sol le faible taux d'argile serait un facteur favorable à la biodégradation extra-agrégat (Jacquin et Vong, 1990 ; Sulce, 1993).

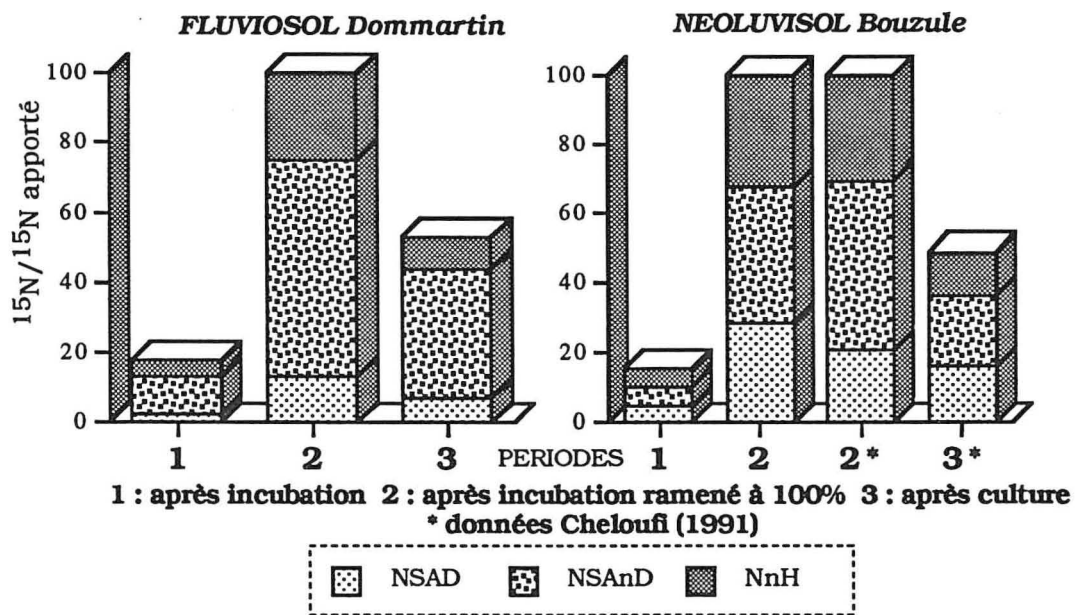
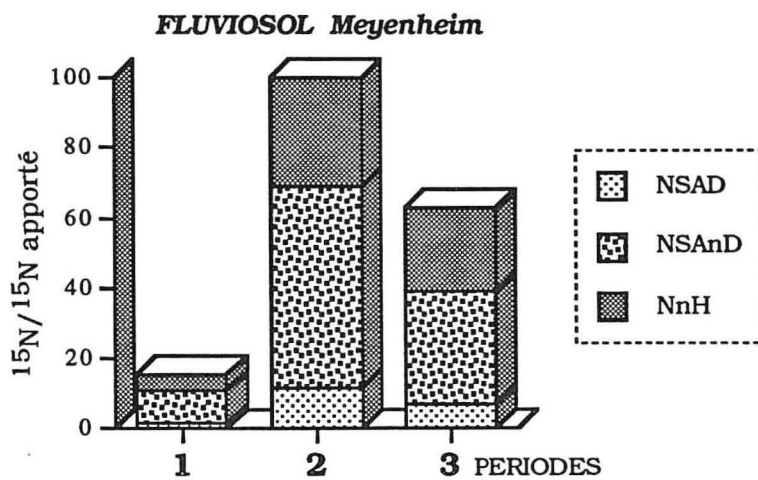


Planche 6.2 : reminéralisation des différentes fractions organiques azotées (FLUVIOSOL de Dommartin et NEOLUVISOL)



1 : après incubation 2 : après incubation ramené à 100% 3 : après culture

Fig 6.3 : reminéralisation des fractions organiques azotées dans le FLUVIOSOL de Meyenheim

Cas du CALCOSOL d'Obernai et du PELOSOL de la Bouzule (planche 6.3). Ces deux sols présentent des turnovers très proches, respectivement 29,2 et 28,7%, mais les taux de reminéralisation des différentes fractions organiques ne sont pas similaires. En effet, pour le CALCOSOL presque toute la reminéralisation mesurée est expliquée par la fraction NSAnD (26,3%), la participation des deux autres fractions étant très faibles ; ce fait confirme les résultats obtenus par Vong *et al.* (1989) sur un sol argilo-calcaire ; en effet dans les sols calcaires tels que le CALCOSOL, la minéralisation des humines héritées et de polycondensation serait freinée par la formation de gangues de carbonate de calcium ; à l'opposé, l'humine de néosynthèse microbienne inter-agrégats ne serait pas protégée et serait donc soumise à une cinétique de reminéralisation plus intense. Dans le cas du PELOSOL les résultats de Chéloufi (1991) montrent que dans ce sol très argileux, les argiles adsorbent efficacement des composés aliphatiques très riches en azote (Andreux et Jocteur-Monrozier, 1981 ; Vong *et al.*, 1989), d'où le faible turnover de ce sol ; cependant nous confirmons à nouveau le rôle prépondérant de la fraction NSAnD (18%) dans les processus de reminéralisation. D'autre part et par rapport aux autres sols tempérés, la contribution de la fraction NSAD est relativement importante (7,1%).

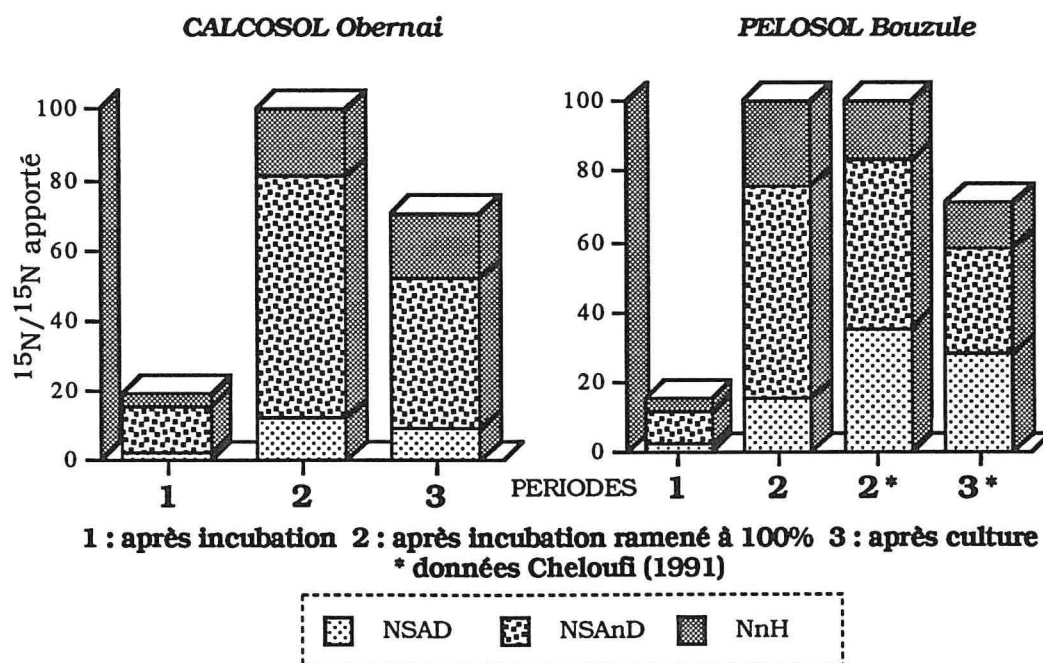


Planche 6.3 : reminéralisation des fractions organiques azotées (CALCOSOL et PELOSOL)

Cas du RENDOSOL de Loisy (fig 6.4). Ce sol présente selon les données de Chéloufi (1991) le plus faible taux de reminéralisation (21,1%). En effet, d'après Duchaufour (1983 et 1991), et Jacquin *et al.*, (1980), dans ce mull carbonaté, la faible reminéralisation serait la conséquence d'une séquestration de la matière organique par des gangues de carbonate de calcium, en plus des acides fulviques et humiques qui précipitent sous formes de fulvates et humates de calcium. La reminéralisation provient principalement des deux fractions NSAnD et NnH (respectivement 10,1 et 19%), la fraction NSAD aurait une différence très faible (2%). Ces résultats confirmant à nouveau le rôle de la fraction NSAnD dans les processus de reminéralisation, mais aussi le rôle non négligeable de la fraction NnH, qui comme nous l'avons discuté avant ne doit pas être seulement liée à des composés hétérocycliques (Jacquin *et al.*, 1992).

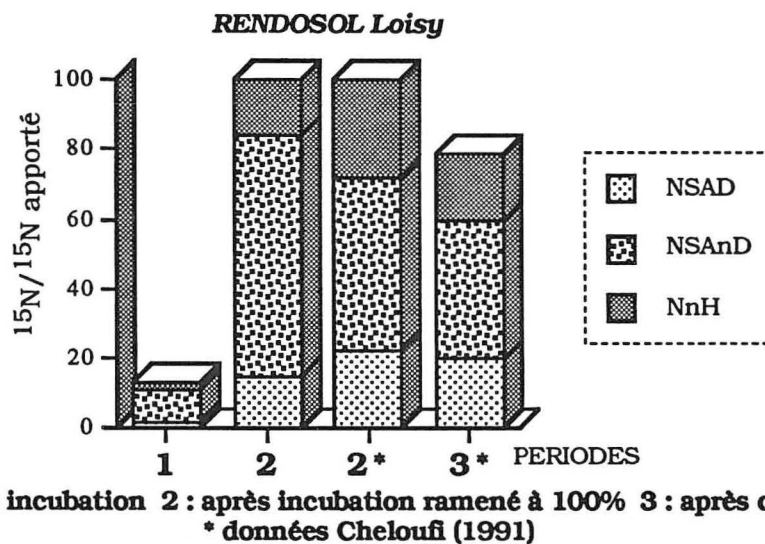


Fig 6.4 : reminéralisation des fractions organiques azotées dans le RENDOSOL

Cas du VERTISOL et du FLUVIOSOL mexicains (planche 6.4). Ces deux sols tropicaux montrent des turnovers très importants dans les deux cas respectivement 40,1 et 50% ; notons que le FLUVIOSOL à texture limono-sableuse montre les taux les plus élevés ; en effet, dans ce sol légèrement acide et bien aéré les processus de reminéralisation peuvent se développer plus intensément. Dans le cas du VERTISOL à texture argileuse, l'effet des argiles de type 2:1 serait la cause de la diminution du turnover.

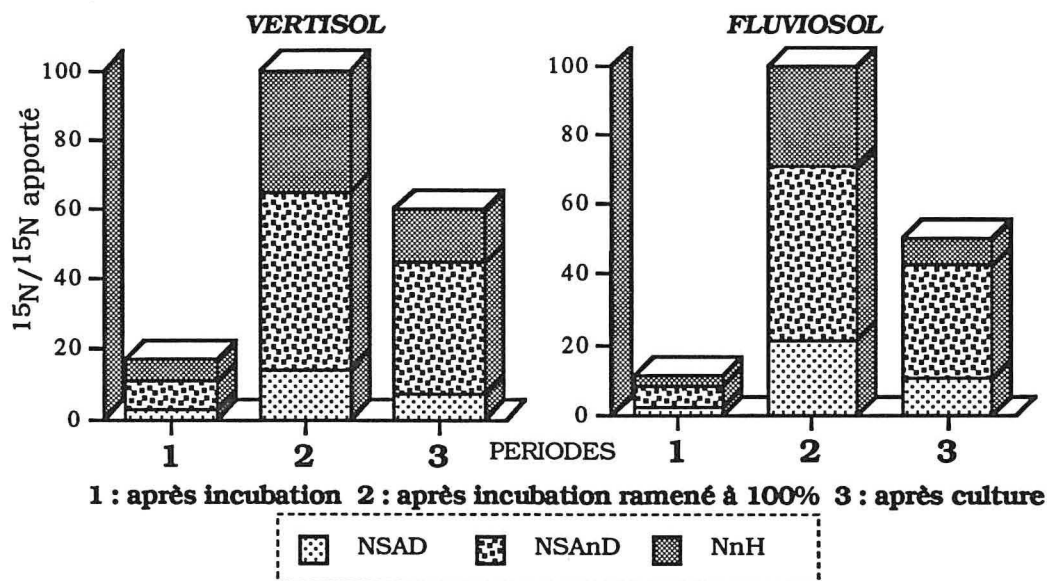


Planche 6.4 : reminéralisation des fractions organiques azotées dans les deux sols tropicaux mexicains

A l'opposé des sols tempérés dans lesquels la fraction NSAnD était la plus importante dans le processus de reminéralisation, dans ces sols tropicaux c'est la fraction NnH qui représente la plus grande différence, respectivement 21,6 et 20,1% pour le FLUVIOSOL et le VERTISOL ; ensuite la fraction NSAnD représente respectivement 17,7 et 12,8% ; enfin la fraction NSAD représente 10,7 et 7,2% respectivement. Ceci témoigne de la vitesse et de l'intensité des réactions d'organisation-minéralisation dans les sols tropicaux, par rapport aux sols tempérés (Sanchez et Miller, 1986 ; Morel, 1989) ; en effet, des composés fraîchement organisés sont ensuite facilement reminéralisés, incluant les fractions dites hétérocycliques. Nous constatons à nouveau l'importance de cette fraction NnH sur le turnover de l'azote de la matière organique ; ceci avait déjà été souligné par Egoumenides *et al.* (1990) et Feller *et al.* (1991) travaillant avec des sols tropicaux, ces auteurs mettent en évidence l'existence de qualités différentes de la matière organique stabilisée pouvant avoir des degrés différents de turnover. A partir de nos résultats nous pouvons donc mentionner la nécessité d'approfondir les recherches sur les constituants de cette fraction non hydrolysable afin de pouvoir séparer le véritable "pool" stabilisé de l'azote dans les sols tropicaux et tempérés à mull eutrophe.

6.3.2.2. Devenir de l'azote reminéralisé

Production de matière sèche et prélèvement d'azote

Nos résultats et ceux de Chéloufi (1991) par rapport à la matière sèche et à l'azote prélevé par le ray-grass, correspondant aux parties aériennes et racines, sont présentés dans les tableaux 6.8 et 6.9 et dans la planche 6.5.

Tableau 6.8 : devenir de l'azote organisé après incubation au cours de neuf semaines de croissance du ray-grass d'Italie

SOL	Q ¹⁵ N org. après incubation	Rende- ments M.S. mg pot ⁻¹	N prélevé mg N kg ⁻¹ sol	Q ¹⁵ N mg ¹⁵ N kg ⁻¹ sol	CRU %	C.B.* %	Pertes** mg ¹⁵ N kg ⁻¹ sol
1) FLUVIOSOL Dommartin	3,647	1436	97,3	1,105	5,4	30,3	0,612 (16,8)
5) CALCOSOL Obernai	3,97	1518	89,3	1,12	5,5	28,2	0,04 (1,0)
6) FLUVIOSOL Meyenheim	3,17	1352	90,5	1,063	5,2	33,5	0,13 (4,1)
7) VERTISOL Mexique	3,52	1494	87,8	1,073	5,2	30,5	0,34 (9,7)
8) FLUVIOSOL Mexique	2,26	1274	94,1	1,08	5,3	47,8	0,05 (2,2)
ANVA		N.S.	N.S.	N.S.			
C.V. %		9,9	8,1	13,7			

* C.B.% : coefficient de biodisponibilité = (Q¹⁵N du ray-grass/Q¹⁵N organisé après incubation) x 100

** les valeurs entre parenthèses sont exprimées par rapport à l'azote quinze organisé après incubation en %

Remarquons d'abord les différences entre nos résultats et ceux de Chéloufi (1991) ; en effet, les sols étudiés par Chéloufi indiquent des rendements et prélèvements d'azote plus élevés que les cinq autres sols, du fait des différents fertilisants employés, sulfate d'ammonium dans le cas de Chéloufi et nitrate de potassium dans notre cas ; ceci a provoqué une organisation plus faible pour le

fertilisant nitrique (tableaux 6.8 et 6.9) en accord avec la bibliographie (Wickramasinghe *et al.*, 1985 ; Jenkinson *et al.*, 1985 ; Shen *et al.*, 1989 ; Recous *et al.*, 1992 ; Azam *et al.*, 1993). L'azote organisé après l'incubation pouvant être reminéralisé était donc inférieur dans les cinq sols que nous avons étudiés.

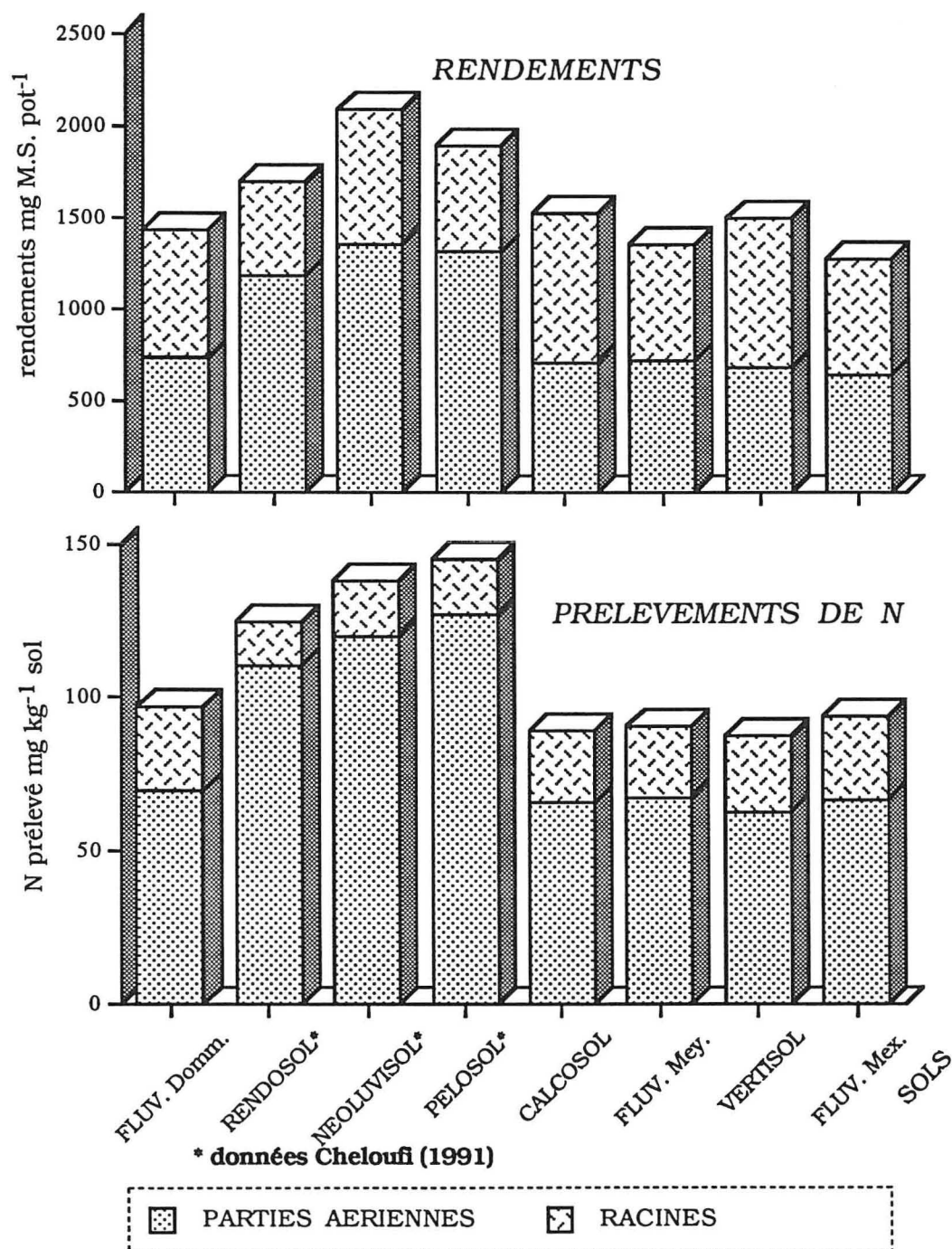


Planche 6.5 : rendements et prélèvements d'azote du ray-grass dans les huit sols étudiés

Dans le cas de nos résultats (tableau 6.8), notons que nous ne trouvons pas de différences statistiques pour les variables rendements et prélèvements d'azote en accord avec les résultats obtenus par Sulce (1993) ; cependant deux ensembles se dégagent : les FLUVIOSOLS de Dommartin et du Mexique avec des prélèvements supérieurs à 94 mg N kg⁻¹ sol et les trois autres sols avec des prélèvements situés entre 87,8 et 90,5 mg N kg⁻¹ sol, ceci en accord avec la potentialité de ces sols, sauf pour le CALCOSOL d'Obernai, mais dans ce cas les teneurs en carbonate de calcium jouent davantage (Jacquin *et al.*, 1992).

Tableau 6.9 : devenir de l'azote organisé après incubation au cours de neuf semaines de croissance du ray-grass d'Italie (Chéloufi, 1991)

SOL	Q ¹⁵ N org. après incubation	Rendements M.S. ha ⁻¹	N prélevé mg N kg ⁻¹ sol	Q ¹⁵ N mg ¹⁵ N kg ⁻¹ sol	CRU %	C.B.* %	Pertes** mg ¹⁵ N kg ⁻¹ sol
2) RENDOSOL	8,58	1695 b	124,5 b	0,90	2,6	10,5	0,92 (10,7)
3) NEOLUVISOL	7,59	2085 a	138,2 ab	6,39	10,5	48,6	0,2 (2,6)
4) PELOSOL	8,44	1885 ab	145,0 a	1,22	3,5	14,5	1,2 (14,2)
C.V. %		5,7	6,5				

Moyennes suivies de la même lettre sont égales statistiquement

* C.B.% : coefficient de biodisponibilité = (Q¹⁵N du ray-grass/Q¹⁵N organisé après incubation) x 100

** les valeurs entre parenthèses sont exprimées par rapport à l'azote quinze organisé après incubation en %

Dans le cas des trois sols étudiés par Chéloufi (1991), cet auteur trouve des différences significatives pour les deux variables. Par rapport au prélèvement d'azote, le PELOSOL montre les valeurs les plus élevées, suivi du NEOLUVISOL puis du RENDOSOL ; nous constatons ici à nouveau que les teneurs en carbonate de calcium du RENDOSOL jouent le rôle le plus important vis-à-vis des processus de reminéralisation (Jacquin *et al.*, 1992).

Coefficient réel d'utilisation et coefficient de biodisponibilité

Le CRU (parties aériennes et racines) montre des valeurs variables dépendant du type de sol (tableaux 6.8 et 6.9) ; en effet, le NEOLUVISOL présente les valeurs les plus élevées (10,5%), ensuite cinq sols montrent des CRU se situant entre 5,2 et 5,5% (FLUVIOSOLS de Dommartin, de Meyenheim et du Mexique, CALCOSOL d'Obernai et VERTISOL du Mexique), finalement le RENDOSOL et le PELOSOL indiquent les plus faibles valeurs, respectivement 2,6 et 3,5%. Remarquons que les faibles CRU de ces derniers sols coïncident avec leurs potentialités médiocres.

Considérant le coefficient de biodisponibilité (C.B.), soit le ^{15}N absorbé par la culture en provenance du ^{15}N organisé après incubation, nous notons que les trois cas de figures distinguées ci-dessus sont assez bien respectés, sauf pour le FLUVIOSOL mexicain qui rejoint le NEOLUVISOL avec des C.B. entre 47,8 et 48,6% ; quatre sols présentent des C.B. entre 28,2 et 30,5% (FLUVIOSOLS de Dommartin et Meyenheim, CALCOSOL et VERTISOL) ; enfin les deux sols à potentialité médiocre (RENDOSOL et PELOSOL) présentent à nouveau les plus faibles valeurs (respectivement 10,5 et 14,5%).

Ces résultats montrent toute l'importance de l'évolution biochimique des composés azotés de la matière organique en fonction des types de sols. En général on note des taux de minéralisation plus forts dans les sols limoneux et sableux, à complexe organo-minéral peu rigide par rapport aux sols très argileux ou très carbonatés à complexes plus édifiés ; ces résultats sont en accord avec les taux de minéralisation décelés dans certains sols identiques aux nôtres par Vong *et al.* (1989) et dans des sols similaires (Sulce, 1993).

Néanmoins soulignons que suivant les types de sols l'azote reminéralisé ne se retrouve pas entièrement dans la biomasse végétale ; en effet, nous constatons des pertes variant entre 14,2 et 16,8% de l'azote organisé après incubation respectivement pour le PELOSOL et le FLUVIOSOL de Dommartin, d'environ 10% pour le RENDOSOL et le VERTISOL et entre 1,0 et 4,1% pour le reste des sols (tableaux 6.8 et 6.9).

D'autre part si l'on examine pour chacune des coupes l'évolution du CRU (fig 6.5) nous remarquons que l'engrais

reminéralisé est majoritairement prélevé par la plante lors de la première coupe, à l'exception du PELOSOL où ce prélèvement est à augmentation progressive de la première à la deuxième coupe ; ces résultats rejoignent ceux de Jacquin *et al.* (1992) et de Sulce (1993) et permettent de conclure que dans les sols sableux et à texture équilibrée l'azote quinze est organisé majoritairement sous forme de biomasse libre inter-agrégat, dont le turnover est très rapide. Dans les sols très argileux, du fait de leur structure compacte, une bonne partie de ^{15}N est organisé par des phénomènes d'adsorption physico-chimique où les structures humiques stables sont capables d'empêcher un flux de minéralisation important.

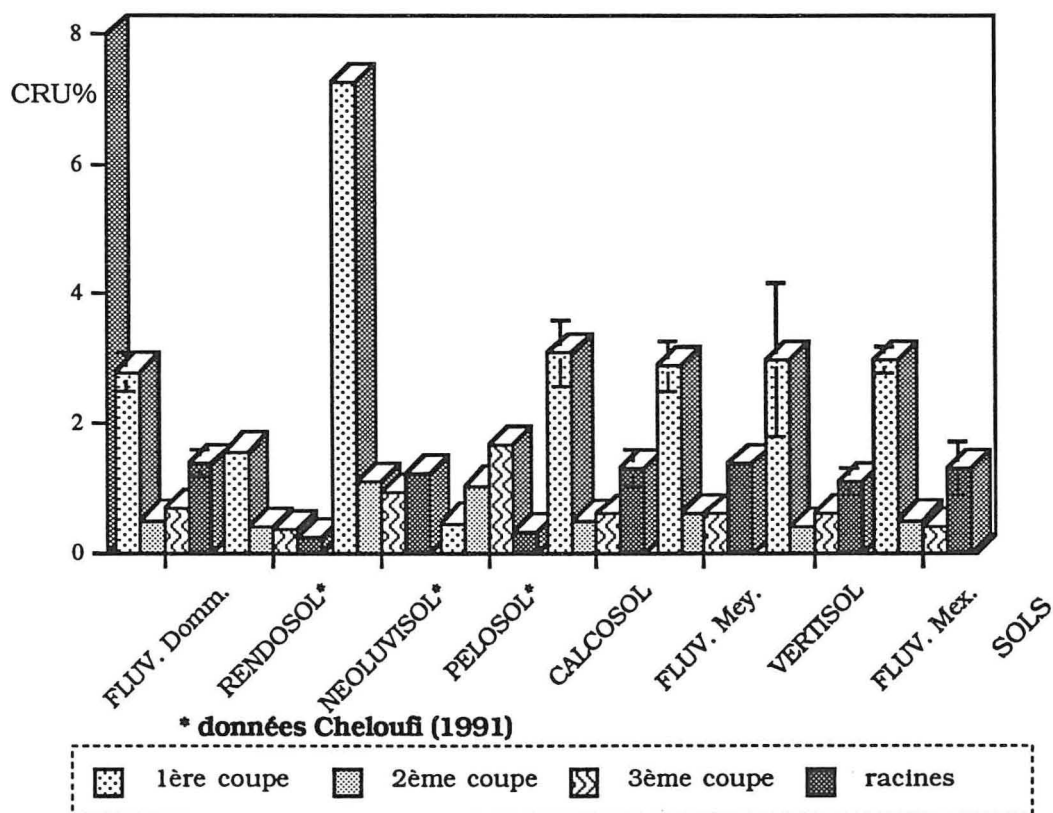


Fig 6.5 : Coefficient Réel d'Utilisation pour les huit sols en fonction de chaque coupe de ray-grass

6.4 CONCLUSIONS

Cette étude en conditions contrôlées nous a permis dans un premier temps de quantifier les transformations et interactions d'un apport de fertilisant nitrique ($K^{15}NO_3$) sur le "pool" minéral du sol, dans un deuxième temps de cerner les processus d'organisation de l'azote engrais dans le sol, et enfin de déterminer l'intensité de reminéralisation de cet engrais organisé ainsi que la qualité de cette reminéralisation en fonction des compartiments organiques azotés.

* * * * *

Nous avons constaté que l'azote minéral ammoniacal présent en quantités importantes dans les huit sols au début de l'expérience reste très faible, voire inexistant, après un mois d'incubation, témoignant des intenses processus d'organisation microbienne et nitrification ayant lieu dans ces conditions idéales.

Par ailleurs, la minéralisation nette (MN) mesurée sur le traitement témoin indique d'un côté des valeurs importantes liées à la potentialité agricole des sols (FLUVIOSOLS de Dommartin et du Mexique) et d'un autre côté des valeurs intermédiaires à faibles, liées aux teneurs en matière organique fortes (RENDOSOL, PELOSOL) ou aux teneurs en matière organique plus faibles mais avec une texture équilibrée (CALCOSOL, NEOLUVISOL et VERTISOL) ; enfin la minéralisation nette la plus faible est constatée pour le sol le plus sableux (FLUVIOSOL de Meyenheim).

La minéralisation nette (MN) du traitement fertilisé présente dans la moitié des cas des valeurs négatives (RENDOSOL, NEOLUVISOL, CALCOSOL et FLUVIOSOL de Meyenheim) liées aux pertes les plus importantes. Les FLUVIOSOLS de Dommartin et du Mexique à bonne potentialité agricole montrent les valeurs les plus élevées, enfin le PELOSOL et le VERTISOL indiquent des faibles taux de MN.

* * * * *

Ces résultats nous ont permis de démontrer que l'ANI calculée par la différence entre la MN du traitement fertilisé et celle du traitement témoin (ANI réelle) est nulle ou négative dans tous les cas ; par contre l'ANI apparente calculée par la différence entre le QNdfs minéral du traitement fertilisé et le N minéral présent dans le traitement témoin est toujours positive à l'exception du NEOLUVISOL, et dans tous les cas due à des substitutions entre les

"pools" organisé et minéral des sols. Néanmoins dans les sols tropicaux mexicains, ces ANI seraient dues aussi à la substitution de "pools" au moment de la dénitrification et à des réactions de déplacement des ions NH_4^+ du sol par les ions K^+ du fertilisant.

* * * * *

Les principaux résultats relatifs à l'organisation de l'azote engrais soulignent l'importance de la rapidité de l'organisation lors de l'apport d'un engrais nitrique. De ce fait, cette rapidité montre l'ampleur de la compétition qui peut se livrer entre la biomasse microbienne et les végétaux lorsque le sol est enrichi en azote minéral. Par ailleurs les intensités d'organisation du ^{15}N variable selon le type de sol, mettent en évidence l'influence du complexe organo-minéral.

Les taux d'organisation de l'azote engrais dans les sols français varient en fonction de la potentialité agricole des sols et des teneurs en carbone organique avec la hiérarchie suivante : CALCOSOL (19,3%) > FLUVIOSOL Dommartin (17,8%) > FLUVIOSOL Meyenheim et NEOLUVISOL (15,5%) > PELOSOL (15%) > RENDOSOL (13,3%).

Dans le cas des sols mexicains par contre les taux d'organisation sont liés surtout aux teneurs en argile et aux pH des sols ; en effet, le VERTISOL à texture argileuse et à pH légèrement acide présente une organisation de 17,1% et le FLUVIOSOL à texture limono-sableuse et à pH modérément acide montre une organisation de 11%.

L'azote de l'engrais organisé dans le sol se trouve incorporé dans les trois compartiments organiques des sols avec une organisation préférentielle de la fraction soluble dans l'acide et non distillable (NSAnD). Ce résultat souligne le rôle de la biomasse microbienne dans ce processus de stockage de l'azote dans les sols. L'organisation au sein de cette fraction varie en se montrant particulièrement élevée (environ 69%) pour les sols calcaires (RENDOSOL et CALCOSOL) et faible pour les deux sols tropicaux (environ 50%) et le NEOLUVISOL (environ 39%). Les autres sols présentent des valeurs intermédiaires.

Par ailleurs la fraction soluble dans l'acide et distillable (NSAD), montre dans la plupart des cas une relation avec les teneurs en argile. Finalement la fraction non hydrolysable (NnH) se montre très

variable avec cependant les plus petites valeurs (<20%) pour les deux sols calcaires (RENDOSOL et CALCOSOL).

Nous constatons des différences d'organisation pour trois sols (RENDOSOL, NEOLUVISOL et PELOSOL) ayant été étudiés par Chéloufi (1991) ; en effet, nos résultats montrent une organisation plus faible variant en qualité par rapport à celle déterminée par Chéloufi ; le type de fertilisant utilisé ($K^{15}NO_3$ dans notre cas et $(^{15}NH_4)_2SO_4$ dans le cas de Chéloufi) serait à l'origine de ces différences ; néanmoins dans les deux études la fraction NSAnD est majoritaire.

* * * * *

L'élimination de l'azote minéral à l'issue de l'incubation suivie immédiatement par l'implantation d'une plante test, montre la participation de l'azote ainsi organisé à la nutrition des végétaux. Pour cette partie des résultats nous avons utilisé les données de Chéloufi (1991) pour trois sols : RENDOSOL, NEOLUVISOL et PELOSOL, les cinq autres ont été suivis par nous-même.

Les intensités de reminéralisation varient en fonction des types de sols ; dans le cas des sols français les taux de reminéralisation se situent comme suit :

NEOLUVISOL et FLUVIOSOL Dommartin (51-47%) > FLUVIOSOL Meyenheim (37,5%) > CALCOSOL, PELOSOL et RENDOSOL (29-21%).

Ces résultats suggèrent une localisation de la biomasse microbienne préférentiellement en position extra-agrégats pour les trois premiers sols ; en revanche pour les autres sols, la moindre reminéralisation correspondrait à une position inter-agrégats.

Par ailleurs nos résultats indiquent aussi que le ^{15}N reminéralisé provient de toutes les fractions organiques azotées mais majoritairement de la fraction NSAnD ; le turnover très important de cette fraction qui pourrait correspondre à de l'azote provenant des corps microbiens montre bien le rôle de la biomasse microbienne dans les processus d'organisation-reminéralisation de l'azote.

Dans les sols tropicaux mexicains le FLUVIOSOL montre un taux d'organisation plus élevé que le VERTISOL, respectivement (50 et 40%). Dans ces sols nous avons constaté à nouveau que l'azote reminéralisé provient des trois fractions, mais à l'opposé des sols français, la plupart de cet azote reminéralisé provient de la fraction NnH, puis de la fraction NSAnD et finalement de la fraction NSAD. La

rapidité et l'intensité des processus d'organisation-minéralisation liées aux types de microorganismes dans ces sols tropicaux ayant permis la reminéralisation de cette fraction dite "hétérocyclique".

La mise en évidence d'une reminéralisation de cette fraction NnH (non négligeable dans la plupart des sols français et importante dans les sols tropicaux mexicains), nous permet de considérer que les structures résistant à l'hydrolyse par HCl 6N ne correspondent pas exclusivement à de l'azote irréversiblement incorporé dans les polycondensats humiques ; une partie de cet azote non hydrolysable par définition serait donc biodégradable et pourrait correspondre à une fraction particulière des protéines inter-agrégats.

Les CRU du ray-grass varient en fonction des types de sols s'étalant entre 2,6 et 10,5%. En considérant le prélèvement de ¹⁵N organisé après incubation nous observons des coefficients de biodisponibilité (C.B.) d'environ 48% pour le NEOLUVISOL et le FLUVIOSOL mexicain ; entre 28,2 et 30,5% pour les FLUVIOSOLS de Dommartin et Meyenheim, le CALCOSOL et le VERTISOL ; finalement les plus faibles C.B. sont constatés pour le RENDOSOL et le PELOSOL (respectivement 10,5 et 14,5%).

* * * * *

Cette étude met donc en évidence l'influence des caractères pédogénétiques sur l'évolution biochimique des différents compartiments composant les réserves organiques azotées des sols cultivés lors de l'apport d'un fertilisant minéral.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Ce mémoire a pour objectif principal l'étude des potentialités agronomiques des sols et leurs relations avec le cycle interne de l'azote dans différents types de sols cultivés en maïs du Nord-Est de la France et du Sud-Est du Mexique.

* * * * *

A partir de l'étude agropédologique à l'échelle du 1/25000^e de deux secteurs de références situés en Lorraine, nous avons entrepris une démarche visant à mettre en relation les potentialités naturelles des sols, avec les rendements agronomiques obtenus pendant trois campagnes agricoles.

L'utilisation des dénominations des sols à partir des classifications taxonomiques, par rapport à la définition des classes d'aptitude culturale à l'échelle du secteur de références, s'avère insuffisante ; cependant l'utilisation d'un référentiel pédologique à la place d'une classification hiérarchique, par sa possibilité d'adjonction de multiples qualificatifs, peut mieux répondre à ces préoccupations pratiques ; en revanche il y a un risque de manque d'homogénéité dans la désignation d'un même sol.

Nous avons trouvé des relations assez étroites entre les aptitudes culturales des sols définies par l'intermédiaire de deux classifications (système américain de huit classes et approche paramétrique française). Les différences entre les tendances exprimant les potentialités apparaissent à l'intérieur de chaque classe d'aptitude ; ceci confirme que ces systèmes de classification diffèrent davantage par le poids donné aux facteurs limitants que par les facteurs limitants eux-mêmes. Le comportement des paramètres permanents du sol est modifié par les effets du climat lesquels influencent les caractéristiques bio-chimiques des sols ; cette modification s'exprime par les rendements obtenus pour une culture donnée ; comparant les classements d'aptitude par rapport aux rendements ponctuels d'un même secteur nous trouvons que ces derniers, pour une année climatique donnée, se rattachent aux classements d'aptitude culturale des sols ; cette liaison n'est pas aussi évidente quand on compare des années climatiques différentes, des cultures à cycles végétatifs variés ou des secteurs de références sur diverses roches-mères.

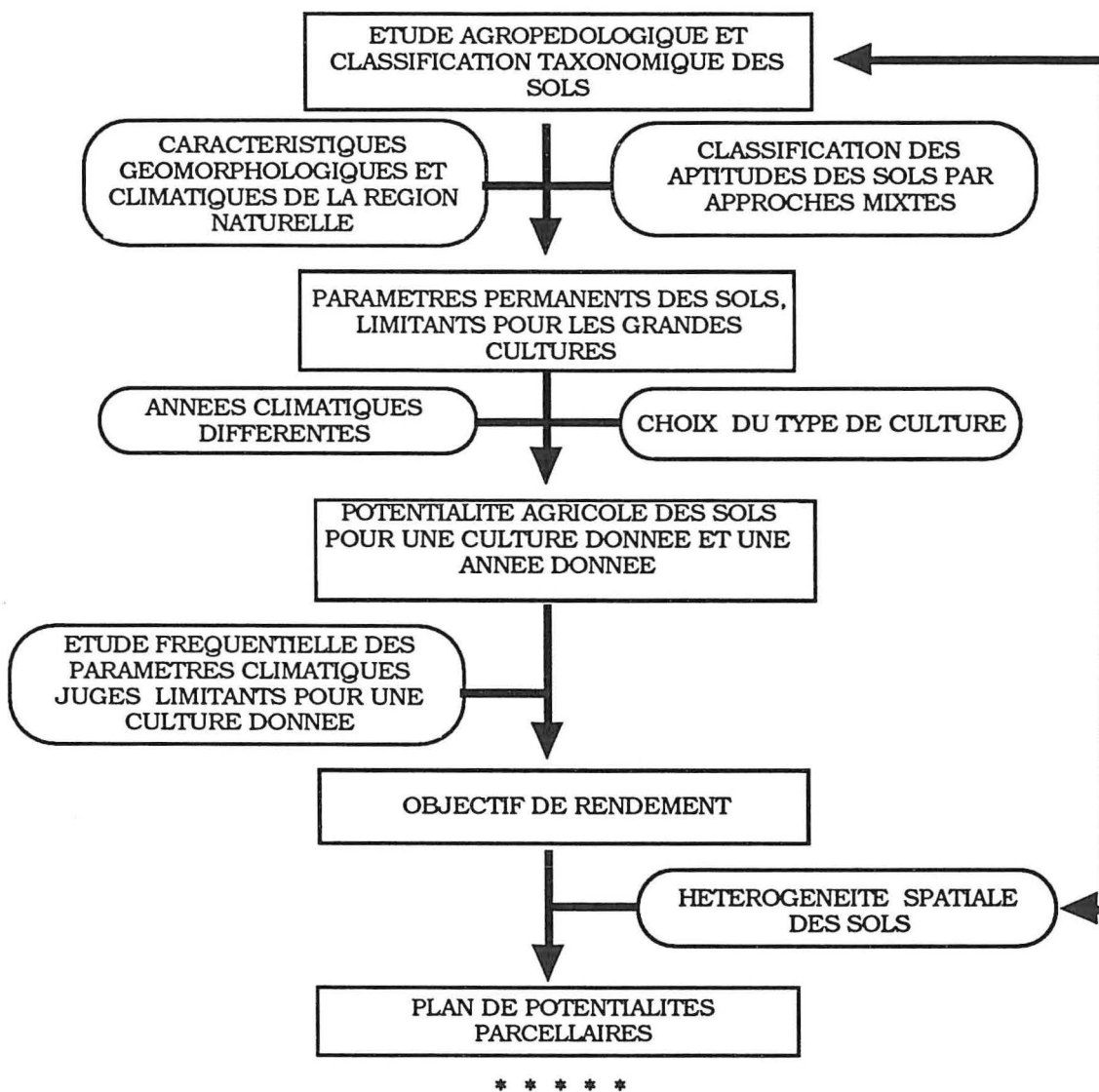
Ces résultats permettent d'envisager l'utilisation d'approches mixtes d'évaluation de la potentialité des sols pour mettre en évidence les facteurs du milieu qui ont une influence sur la

productivité agricole du sol ; ces résultats avec ceux obtenus par d'autres chercheurs travaillant en Lorraine, conduisent à établir une typologie des sols basée sur des études cartographiques déjà réalisées, qui pourra être comparée avec les rendements potentiels des principales cultures. Cette codification, plutôt que classification, des différentes potentialités des sols sera mise en relation avec des paramètres climatiques jugés limitants pour les cultures d'intérêt régional ; une étude fréquentielle de ces paramètres climatiques, permettra de définir un potentiel de rendement accessible pour une prise de risque donnée (CRAL-ENSAIA, 1993). Ce travail est en cours de réalisation et permet de proposer des itinéraires techniques respectant l'environnement. Des améliorations de cette démarche sont envisageables afin de compléter cette typologie qui doit rester la plus simple possible. Néanmoins il faut tenir compte d'une hétérogénéité éventuelle des sols à l'échelle de la parcelle, afin d'adopter une conduite culturale adaptée (Jacquin *et al.*, 1993).

L'utilisation de cette recherche, résumée dans le schéma ci-après, pour la mise en oeuvre d'un dispositif similaire dans la région tropicale du Mexique est possible. Dans cette région il a été réalisé d'une part une carte régionale des sols au niveau des grands groupes du système américain (*Soil Taxonomy*) et d'autre part les différentes séries de sols ont été répertoriées à partir d'études de sols à grande et moyenne échelle. Nos travaux ainsi que ceux réalisés par Sanchez *et al.* (1982) dans la région tropicale de l'Amérique du Sud, concernant une classification de la fertilité des sols peuvent indiquer le chemin à suivre afin d'optimiser le développement agricole régional.

* * * * *

Une fois définie une méthodologie établissant un objectif de rendement grâce à l'analyse des potentialités des sols, nous avons poursuivi nos recherches sur l'un des paramètres externes importants sur le niveau de fertilité ; notre choix a porté sur la fertilisation azotée et son devenir dans divers types de sols. Nous avons choisi comme espèce végétale le maïs en fonction de sa répartition à l'échelle mondiale, afin de proposer des références pour une production, en accord avec la potentialité des sols et ceci sans nuire à la qualité de l'environnement.



Le suivi des teneurs en nitrates dans les différents sols des deux secteurs de références lorrains a permis de constater qu'il existait une relation directe entre les potentialités et les teneurs en nitrates donc avec les rythmes de minéralisation. Des sols à bonnes aptitudes agricoles peuvent être difficiles à gérer en considérant les risques de lixiviation des nitrates, ces derniers étant estimés par les reliquats azotés présents dans les sols à la récolte.

Cette étude des teneurs en nitrates dans différents types de sols nous a montré l'incidence de l'hétérogénéité parcellaire, hétérogénéité qui doit être prise en compte pour définir les objectifs de rendement de la parcelle donc la fertilisation azotée.

Sur un plan plus fondamental l'étude du bilan azoté a permis de mettre en évidence l'importance des processus d'organisation biologique microbienne, mais également du taux de reminéralisation de l'azote engrais dans certains sols à faible potentialité agricole.

Aussi à partir de ces résultats nous éprouvions la nécessité d'approfondir nos investigations sur le devenir des engrais azotés dans des sols à potentialités différentes.

Nous avons donc établi au champ des essais avec des doses croissantes d'un fertilisant azoté (NH_4NO_3) dans quatre types de sols en Lorraine, deux types de sols en Alsace et deux sols tropicaux du Sud-Est du Mexique, tous sous culture de maïs. Un marquage du fertilisant avec ^{15}N a été pratiqué pour certaines doses. Les essais ont été réalisés en 1992 et poursuivis en 1993 seulement pour les sols français.

L'analyse des réponses aux diverses doses de fertilisant nous a permis, dans la plupart des cas, de confirmer l'influence des aptitudes culturales des sols sur le niveau de production agricole et les coefficients d'efficacité du fertilisant. Nos résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Variables		Sols à bonne potentialité	Sols à potentialité moyenne	Sols à potentialité médiocre
Rendements t ha ⁻¹	France(M.S.)	20	15	12
	Mexique (grain-M.S.)	4,6-9,0	5,2-8,7	-
CAU %	France	69	59	59
	Mexique	79	88	-
CRU %	France	49	46	34
	Mexique	74	55	-
Valeur A* kg N ha ⁻¹	France	298	291	354
	Mexique	61	118	-

* équivalent ammonitrate

Les rendements à l'optimum de la courbe de réponse obtenus en France sont en accord avec la hiérarchie des classes d'aptitude des sols. Au Mexique par contre, nous constatons un comportement contraire aux classes d'aptitude pour le maïs grain.

Le Coefficient Apparent d'Utilisation de l'engrais azoté (CAU) présente des valeurs négligeables dans les essais où nous n'avons pas de réponse aux différentes doses d'azote. Dans les autres cas nous observons une grande variabilité des valeurs des CAU. Cependant si

nous ne considérons que les valeurs à la dose optimale, un effet type de sol semble se dégager : pour les sols français les valeurs de CAU suivent la hiérarchie des classes d'aptitude des sols, mais les sols à potentialité médiocre montrent, en moyenne, des CAU similaires à ceux des sols à potentialité intermédiaire.

Pour les sols mexicains les tendances de CAU confirment celles observées pour les rendements, le sol à meilleure aptitude montre un CAU inférieur ; mais dans les deux cas le CAU est très élevé ; ce fait indiquerait une faible participation de l'azote provenant du sol dans la nutrition de la plante.

Les Coefficients Réels d'Utilisation de l'azote engrais (CRU) sont dans la plupart des cas en accord avec les valeurs signalées dans la bibliographie, soit entre 35 et 55% pour des apports au semis et entre 55 et 73% pour des apports tardifs, ceci malgré le manque de réponse à l'engrais azoté de certains sols lorrains. Les valeurs de CRU à l'optimum de la courbe de réponse des sols français sont supérieures à 45% pour les sols à bonne et moyenne potentialité, les sols à potentialité médiocre montrent des CRU plus faibles. Dans le cas des sols mexicains, les CRU sont très élevés et en accord avec les classes de potentialité

Pour les sols de France nous remarquons des valeurs A élevées pour les sols à potentialité médiocre, se traduisant par des Ndff faibles dans la plante ; les sols à bonne et moyenne potentialité montrent des valeurs similaires. Les valeurs A les plus petites sont observées pour les sols tropicaux mexicains du fait de l'application du fertilisant en bande et de la faible participation des réserves organiques azotées du sol à la fourniture d'azote pour le maïs.

L'interaction entre l'azote engrais et l'azote endogène du sol (effet ANI) ne montre pas de tendances significatives pour les différents types de sols.

Par ailleurs, observant les effets de doses sur les variables mesurées nous remarquons que les valeurs des CAU sont très variables par rapport aux doses d'engrais, notamment pour les doses en dessous de l'optimum.

Les différences de CRU par rapport aux doses d'azote, sont dans la plupart des cas non significatives statistiquement, même pour des doses extrêmes. Pour les sols français dans la plupart des cas les valeurs optimales du CRU ont été observées pour les doses à

l'optimum de la courbe de réponse ; par contre pour les deux sols mexicains les meilleurs CRU correspondent aux doses les plus élevées.

Pour les sols lorrains l'application de la dose X au stade huit feuilles a permis des augmentations du CRU dans la plupart des cas, mais toutes les différences ne sont pas significatives statistiquement. Notons que ces apports tardifs d'engrais ne se traduisent pas par une augmentation du rendement, mais cette meilleure efficacité du fertilisant aurait un effet non négligeable sur l'aspect environnemental.

Le calcul de la valeur A considérée comme une estimation du pouvoir alimentaire en azote du sol indique des valeurs A statistiquement constantes par rapport à la dose du fertilisant azoté ; ceci est conforme à la bibliographie.

L'ANI ne montre pas de tendances par rapport aux doses d'engrais, même si elle est positive dans la plupart des cas, malgré le manque de réponse à la fertilisation azotée et les applications de fumier dans certains sols ; ces valeurs d'ANI apparentes positives seraient liées à des substitutions de "pools". Comparant les valeurs d'ANI obtenues après apports de fertilisant au stade 8 feuilles par rapport à une fertilisation au semis, nous constatons une nette décroissance de l'ANI pour les apports plus tardifs, ceci confirme donc que les mécanismes de substitution entre "pools" seraient plus intenses lorsque les prélèvements d'azote par la plante seraient plus faibles ; révélant ainsi la compétition entre l'immobilisation biologique de la plante et celle de l'organisation par la biomasse microbienne.

Enfin nous avons observé dans tous nos protocoles qu'il n'existait pas de rapport entre les diverses doses de N et le QNdfs ; par contre il existe une corrélation positive entre les diverses doses et le QNdff. Nous confirmons donc que les coefficients d'efficacité de Ndfs et Ndff sont différents, ce qui met à nouveau en évidence la substitution de "pools".

Comparant les valeurs de CRU et de CAU obtenus pour les doses où il existe une réponse à l'engrais azoté nous remarquons que la plupart des valeurs de CAU sont plus grandes que celles du CRU (effet ANI apparente par substitutions de "pools") ; comme nous n'avons pas réussi à mettre en évidence une corrélation entre ces deux variables l'utilisation du CRU pour mesurer l'efficacité réel des fertilisants azotés reste donc nécessaire ; cependant l'utilisation des valeurs de

CAU dans une formule du bilan simplifiée peut être envisagé si l'on se base sur la dose optimale de la courbe de réponse et que la fourniture de l'azote du sol est estimée par le témoin sans azote (Limaux, 1994) ; en effet, nos résultats à l'aide du ^{15}N confirment que l'azote prélevé par le témoin sans engrais (No) est bien corrélé au QNdfs et à la valeur A. L'utilisation de l'azote prélevé par le témoin comme estimation des fournitures d'azote du sol est donc tout-à-fait possible, mais il reste à multiplier les essais pour trouver un modèle statistique permettant d'obtenir une équation pour calculer le QNdfs à partir du No. Enfin nous observons que QNdfs et la valeur A sont indépendants des doses d'azote ; autrement dit, les fournitures d'azote par le sol ne montrent pas de différences quelle que soit la dose tout en présentant des interactions (effet ANI).

* * * * *

A partir de ces protocoles de terrain nous avons observé les teneurs en azote minéral disponible dans les sols face aux problèmes environnementaux.

Pour les sols français, nos résultats confirment la nécessité de ne pas dépasser les doses optimales raisonnées pour des conditions climatiques déterminées afin de limiter les risques d'entraînement des nitrates. Soulignons que les agrosystèmes lorrains liés à une intensification fourragère conduisent à des apports importants de fumier sur des parcelles réservées à la culture de maïs fourrage ; cet apport d'azote organique provoque des risques élevés de lixiviation des nitrates, notamment pendant la période interculturelle. En conséquence dans les sols lorrains ayant reçu des apports de fumier, l'utilisation de la fertilisation azotée n'est pas toujours nécessaire et dans la plupart des cas on devrait se contenter de doses faibles apportées au stade 7-8 feuilles.

Pour les sols mexicains nous constatons des teneurs élevées en N minéral dans le sol tout le long du cycle cultural, avec des fluctuations variant en fonction des prélèvements d'azote par la plante, cependant ces prélèvements laissent toujours dans le sol une quantité importante d'azote disponible. Ceci met en évidence l'intensité des processus de minéralisation-organisation en zone tropicale humide dans des sols chimiquement riches. Comme à la récolte les différences entre les parcelles témoins et celles fertilisées ne sont pas très différentes et comme les CRU sont élevés, il nous est

difficile d'estimer les risques de lixiviation des nitrates en fonction de l'apport d'engrais.

* * * * *

Poursuivant nos investigations nous avons réalisé une expérience en conditions contrôlées afin d'étudier les phénomènes liés aux taux d'organisation-reminéralisation. Pour cette étude un engrais azoté marqué à l'azote quinze ($K^{15}NO_3$) a été apporté à un échantillon issu de l'horizon labouré de huit types de sols.

Nous avons constaté que l'azote minéral ammoniacal présent en quantités importantes dans les huit sols au début de l'expérience décroît pour atteindre des valeurs très faibles, voire nulles, après un mois d'incubation, témoignant d'intenses processus d'organisation microbienne et nitrification ayant lieu dans ces conditions idéales.

Le calcul de la minéralisation nette (MN) pour les traitements témoin et fertilisé nous a permis de démontrer que l'ANI calculée par la différence entre la MN du traitement fertilisé et celle du traitement témoin (ANI réelle) est nulle ou négative dans tous les cas ; par contre l'ANI apparente calculée par la différence entre le QNdfs minéral du traitement fertilisé et le N minéral présent dans le traitement témoin est dans la plupart des cas positive ; cette ANI est due, pour les sols français, à des substitutions entre les "pools" organisé et minéral des sols. Dans les sols tropicaux mexicains, ces ANI seraient également dues à la substitution de "pools" au moment de la dénitrification et à des réactions de déplacement des ions NH_4^+ du sol par les ions K^+ du fertilisant.

Les principaux résultats relatifs à l'organisation de l'azote engrais soulignent la rapidité de l'organisation lors de l'apport d'un engrais. De ce fait, elle montre l'ampleur de la compétition existante entre la biomasse microbienne et les végétaux lorsque le sol est enrichi en azote minéral. Par ailleurs les intensités d'organisation du ^{15}N variables selon le type de sol, mettent en évidence l'influence du complexe organo-minéral. Les taux d'organisation de l'azote engrais dans les sols français varient en fonction de la potentialité agricole des sols et des teneurs en carbone organique. Dans le cas des sols mexicains les taux d'organisation sont surtout liés aux teneurs en argile et aux pH des sols

L'azote de l'engrais organisé dans le sol se trouve incorporé dans les trois compartiments organiques des sols avec une organisation préférentielle de la fraction soluble dans l'acide et non

distillable (NSAnD). Ce résultat souligne le rôle de la biomasse microbienne dans ce processus de stockage de l'azote dans les sols. Par ailleurs la fraction soluble dans l'acide et distillable (NSAD), montre dans la plupart des cas une relation avec les teneurs en argiles ; la fraction non hydrolysable (NnH) se montre très variable.

Nous constatons des différences d'organisation pour trois sols (RENDOSOL, NEOLUVISOL et PELOSOL) entre nos résultats et ceux obtenus par Chéloufi (1991) ; en effet, cette comparaison révèle une organisation plus faible et variable en qualité par rapport à celle déterminée par cet auteur ; le type de fertilisant utilisé ($K^{15}NO_3$ dans notre cas et $(^{15}NH_4)_2SO_4$ dans le cas de Chéloufi) serait à l'origine de ces différences.

L'élimination de l'azote minéral à l'issue de l'incubation suivie immédiatement par l'implantation d'une plante test, montre la participation de l'azote ainsi organisé à la nutrition des végétaux.

Les intensités de reminéralisation varient en fonction des types de sols. Dans le cas des sols français les résultats suggèrent une localisation de la biomasse microbienne préférentiellement en position extra-agrégats pour deux sols (NEOLUVISOL et FLUVIOSOL) ; en revanche pour les autres sols (CALCOSOL, RENDOSOL et PELOSOL), la moindre reminéralisation correspondrait à une position inter-agrégats, ceci peut être lié à la texture et au calcaire des sols. Nos résultats indiquent aussi que le ^{15}N reminéralisé provient de toutes les fractions organiques azotées, mais majoritairement de la fraction NSAnD ; le turnover très important de cette fraction correspondrait à la minéralisation des composés azotés provenant des corps microbiens ; il montre bien le rôle de la biomasse microbienne dans les processus d'organisation-reminéralisation de l'azote.

Dans les sols tropicaux mexicains le FLUVIOSOL montre un taux de reminéralisation plus élevé que le VERTISOL ; dans ces sols nous avons constaté à nouveau que l'azote reminéralisé provient des trois fractions, mais à l'opposé des sols français, la plupart de cet azote reminéralisé provient de la fraction NnH, puis de la fraction NSAnD et finalement de la fraction NSAD. La rapidité et l'intensité des processus d'organisation-minéralisation liées aux types de microorganismes dans ces sols tropicaux ayant permis la reminéralisation de cette fraction dite "hétérocyclique". La mise en

évidence d'une reminéralisation de cette fraction NnH, nous permet de considérer que les structures résistantes à l'hydrolyse par HCl 6N ne correspondent pas exclusivement à de l'azote irréversiblement incorporé dans les polycondensats humiques ; une partie de cet azote non hydrolysable par définition serait donc biodégradable et pourrait correspondre à une fraction particulière des protéines inter-agrégats.

En considérant le prélèvement de ^{15}N organisé après incubation nous observons des coefficients de biodisponibilité (C.B.) d'environ 48% pour le NEOLUVISOL et le FLUVIOSOL mexicain ; entre 28,2 et 30,5% pour les FLUVIOSOLS de Dommartin et Meyenheim, le CALCOSOL et le VERTISOL, finalement les plus faibles C.B. sont constatés pour le RENDOSOL et le PELOSOL (respectivement 10,5 et 14,5%).

* * * * *

L'ensemble des résultats nous a permis, à l'aide des études agro-éco-pédologiques effectuées sur des secteurs de références, de définir le ou les niveaux de potentialité à l'échelle parcellaire pour une culture donnée (le maïs) et pour une année climatique donnée ; il serait donc possible de proposer, avec prise de risque, des plans de potentialités parcellaires. Le suivi du devenir des fertilisants azotés a montré que là encore cette hétérogénéité des sols à l'échelle parcellaire pouvait engendrer des difficultés d'adaptation d'itinéraires techniques raisonnés par rapport aux diverses potentialités. Sur le plan environnemental il faut mentionner l'influence du climat et de l'histoire culturelle sur les risques écologiques se traduisant par un comportement bio-physico-chimique des différents types de sols pour une culture donnée. Ce travail doit être poursuivi afin d'appliquer cette démarche, à différents types de sols, à des années climatiques plus contrastées et à d'autres cultures. Il sera possible de déterminer les paramètres intervenant sur les coefficients apparent et réel d'utilisation d'un engrais azoté et sur les interactions entre azote engrais et réserves endogènes du sol ; par ailleurs on pourra envisager de déterminer les cinétiques des processus d'organisation-reminéralisation de ces sols. L'ensemble de ces connaissances devrait permettre de mieux gérer les différents postes présents dans les formules concernant le bilan prévisionnel d'une fertilisation azotée raisonnée des cultures et ceci sous diverses conditions pédoclimatiques.

BIBLIOGRAPHIE

- About I. et Florentin L., 1989. Teneur en nitrates des eaux de drainage : cas de deux sols lorrains soumis à une monoculture de maïs. C. R. Acad. Agric. Fr., 75 (8), 69-77.
- Adams T.M., 1982. The effects of agronomy on C and N distribution in soil organo-mineral fractions. Journal of Agric. Sci. UK, 98 (2), 335-342.
- Addiscott T.M., 1990. Measurement of nitrate leaching : a review of methods. In : Calvet (ed) "Nitrates-Agriculture-Eau" ; INRA éditions, Paris, 157-168.
- A.F.E.S., 1992. Référentiel pédologique, principaux sols d'Europe. Association Française pour l'Etude du Sol ; INRA éditions - Paris, 222p.
- A.G.P.M., 1988. Azote et maïs raisonner juste. Association Générale des Producteurs de Maïs ; info techniques, brochure, 79p.
- Agrifutur, 1993. Les perspectives du maïs grain et ensilage (dossier maïs). Perspectives Agricoles, 179, 30-41.
- AIEA., 1983. A guide to the use of nitrogen 15 and radioisotopes in studies of plant nutrition : calculations and interpretation of data. A technical document issued by the International Atomic Agency, Vienna, 63p.
- Alfaia S., 1993. Etude de la dynamique de l'azote en utilisant ^{15}N dans les sols cultivés de l'Amazonie brésilienne. Thèse de Doctorat INPL, Nancy, France, 199p.
- Andreux F., 1978. Etude des étapes initiales de la stabilisation physico-chimique et biologique d'acides humiques modèles. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Nancy I, France, 161p.
- Andreux F., Golebiowska D., Choné Th., Jacquin F. et Metche M., 1977. Caractérisation et transformation en milieu mull d'un modèle humique issu de l'autooxydation du système catéchol-glycine et marqué sélectivement au carbone 14. International Atomic Energy Agency, Vienna, 43-57.
- Andreux F. et Jocteur-Monrozier L., 1981. Les apports de la méthode de séparation des substances humiques à la connaissance de la réserve organique azotée dans les sols. In : P. Dutil et F. Jacquin (eds), "Colloque humus-azote", INRA-ENSAIA, Reims, France, 107-113.
- Azam F., Lodhi A. et Ashraf M., 1991. Interaction of ^{15}N -labelled ammonium nitrogen with native soil nitrogen during incubation and growth of maize (*Zea mays L.*). Soil Biol. Biochem., 23 (5), 473-477.

- Azam F., Simmons F.W. et Mulvaney R.L., 1993. Immobilization of ammonium and nitrate and their interaction with native N in three Illinois Mollisols. *Biol. Fertil. Soils*, 15, 50-54.
- Badiane A.N., 1993. Le statut organique d'un sol sableux de la zone Centre-Nord du Sénégal. Thèse de Doctorat INPL, Nancy, France, 200p.
- Baize D., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie. INRA éditions, Paris, 172p.
- Balabane M. et Balesdent J., 1992. Input of fertilizer-derived labelled N to soil organic matter during a growing season of maize in the field. *Soil Biol. Biochem.*, 24 (2), 89-96.
- Balesdent J. et Mariotti A., 1987. Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biol. Biochem.*, 19 (1), 25-30.
- Barron F.S., 1990. Guia para cultivar maiz en Tabasco. INIFAP-SARH ; folleto tecnico N°5, Tabasco, Mexico, 14p.
- Bartelli L.J., 1978. Technical classification system for soil survey interpretation. *Advances in Agronomy*, 30, 247-289.
- Beinroth F.H., Uehara G., Silva J.A., Arnold R.W. et Cady F.B., 1980. Agrotechnology transfer in the tropics based on soil taxonomy. *Advances in Agronomy*, 33, 303-339.
- Bockman O.C., Kaarstad O., Lie O.H. et Richards I., 1990. Agriculture et fertilisation : les engrais - leur avenir. Division Agriculture, Norsk Hydro A.S., Oslo, 258p.
- Boiffin J. et Sébillotte M., 1982. Fertilité, potentialité, aptitudes culturales : signification actuelle pour l'agronomie. In : "Fertilité du milieu et agriculture", n° spécial Bull. Tech. Inf. n° 370-372, 345-353.
- Bonneau M. et Souchier B., 1979. Pédologie 2 : constituants et propriétés du sol. Masson, Paris, 459p.
- Boulaine J., 1980. Pédologie appliquée. Masson, Paris, 220p.
- Brabant P. 1989. Evaluation des terres : quelques règles de base. In : Orstom (ed), "Soltrop 89-actes du premier séminaire franco-africain de pédologie tropicale". Orstom, Paris, 333-334.
- Bremner J.M., 1958. Amino-sugars in soil. *J. Sci. Food Agric.*, 9, 528-532.

- Bremner J.M., 1965. Isotope ratio analysis of nitrogen 15 tracer investigations. In : C.A. Black (ed), "Methods of soil analysis Part.2". American Society of agronomy, Madison, Wisconsin, 1256-1286.
- Bremner J.M., 1967. Nitrogenous compounds. In : A.D. McLaren et G.H. Peterson (eds), "Soil Biochemistry. Marcel Dekker, 19-66.
- Broadbent F.E. et Nakashima T., 1971. Effect of added salts on nitrogen mineralization in three californian soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 35, 457-460.
- Bruckert S., 1979. Séparation des complexes organo-minéraux par tamisage. Biologie Végétale, 3ème série, Fasc. 20,3-7.
- Buol S.W., Sanchez, P.A., Cate, R.B. et Granger M.A., 1975. Soil fertility capability classification: a technical soil classification system for fertility management. In : E. Bornemiza et A. Alvarado (eds), "Soil management in tropical America". N.C. State University, Raleigh, N.C., 126-145.
- Buol S.W., Hole F.D. et McCracken R.J., 1989. Soil genesis and classification. Iowa University Press, 3ème ed. Ames, Iowa, 446p.
- Carlotti B., 1992. Recueil des bases de préconisations de la fertilisation azotée des cultures. CORPEN et Mission Eau-Nitrates, Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement. Paris, 136p.
- Chaney K., 1990. Effect of nitrogen fertilizer rate on soil nitrogen content after harvesting winter wheat. Journal of Agric. Sci., 114, 171-176.
- Chaussod R., Nicolardot B., Soulas G. et Joannes H., 1986. Mesure de la biomasse microbienne dans les sols cultivés : II. Cinétiques de minéralisation de la matière organique microbienne marquée au carbone 14. Rev. Ecol. Biol. Sol, 23(2), 183-196.
- Chaussod R. et Houot S., 1993. La biomasse microbienne des sols : perspectives d'utilisation de cette mesure pour l'estimation de la fourniture d'azote par les sols. In : J. Decroux et J.C. Ignazi (eds), "Matières organiques et agricultures". Gemas-Comifer. Blois, France, 17-26.
- Chéloufi H., 1991. Etude du devenir de fertilisants azotés minéraux dans quatre types de sols cultivés lorrains : conséquences agronomiques et écologiques. Thèse de Doctorat INPL, Nancy, France, 150p.
- Chéloufi H., Longa N., Florentin L. et Morlot M., 1990. Contribution à l'étude de l'influence des agrosystèmes et d'un apport de fertilisant azoté sur la qualité des eaux potables. Cas des eaux de captage de la commune de Loisy-Meurthe et Moselle. C.R. Acad. Agric. Fr., 76 (5), 145-155.

- Chotte J.L., Louri J., Hetier J.M., Castellanet C., De Guiran E., Clairon M. et Mathieu M., 1990. Effet de divers précédents culturaux sur l'utilisation de l'azote par le maïs, apport d'urée ^{15}N sur quatre types de sols tropicaux (Petites Antilles). *L'Agronomie tropicale*, 45 (1), 67-73.
- Christensen B.T., 1985. Carbon and nitrogen in particle size fractions insolated from danish arable soils by ultrasonic dispersion and gravity sedimentation. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 35 (2), 175-187.
- Cline M.G., 1980. Experience with soil taxonomy of the United States. *Advances in Agronomy*, 33, 193-226.
- Colegio de Postgraduados, 1977. Manual de conservación del suelo y del agua. C.P-SARH. Chapingo, Mexico, 584p.
- Comifer, 1993. Glossaire de la Fertilisation N-P-K. Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée. Paris, 18p.
- Comité Action Potentialités, 1993. La tarière, outil de description des sols. C.A.P. Brochure, 8p.
- Cortez J. et Hamed R., 1992. Mineralization of ^{15}N -labelled organic compounds adsorbed on soil size fractions : effect of successive wheat cropping. *Soil Biol. Biochem.*, 24 (2), 113-119.
- Coûteux M-M. et Sallih Z., 1994. Fate of inorganic ^{15}N in the profile of different coniferous forest soils. *Biol. Fertil. Soils*, 17, 101-107.
- C.P.C.S., 1967. Classification des sols. Commission de Pédologie et Cartographie des sols. Paris, 96p.
- C.R.A.L., 1991. Grille de fournitures en azote du sol pour le maïs ensilage. Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine. Brochure, 2p.
- C.R.A.L. - ENSAIA, 1993. Connaître les sols lorrains et leur potentiel de production. Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine et Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industriels Alimentaires. Nancy, France 43p.
- Dashman T. et Stotsky G., 1982. Adsorption and binding of amino-acids on homoionic montmorillonite and kaolinite. *Soil Biol. Biochem.*, 14(1), 447-456.
- Dalemberg J.M., et Jager G., 1989. Priming effect of some organic additions to ^{14}C -labelled soil. *Soil Biol. Biochem.*, 21(3), 443-448.
- Delphin J.E., 1981. Incidence de l'azote minéral du sol sur la minéralisation. In : P. Dutil et F. Jacquin (eds), "Colloque humus-azote". INRA-ENSAIA. Reims, France, 363-379.

- Delphin J.E., 1993. Azote : le sol en libère aussi. Cultivar n°335, 34-35.
- Delsert E., 1993. Quelles possibilités pour l'utilisation du logiciel ALES dans le contexte de l'agriculture française ? Application à l'évaluation des potentialités du blé en Lorraine. Mémoire de fin d'études. ISA - Université Catholique de Lille. France, 81p.
- Destain J.P., Guiot J., François E. et Meeus-Verdinne K., 1991. L'apport des bilans de ^{15}N dans l'étude de la fumure azotée des céréales et de son impact environnemental. Revue de l'Agriculture, 44(1), 89-101.
- Desvignes Ph., 1988. Compte-rendu d'activités du secteur fertilisation. Association Générale de Producteurs de maïs. Brochure, 29p.
- Desvignes Ph., 1992. Maïs : fumure azotée bilan simplifié. Perspectives Agricoles n°170, 66-70.
- Desvignes Ph., 1993. Azote sur maïs : un bilan simplifié. Cultivar n°337, 46-47.
- Duchaufour Ph., 1983. Pédologie 1 : Pédogénèse et classification. Masson, 2ème ed. Paris, 489p.
- Duchaufour Ph., 1991. Pédologie : sol végétation, environnement. Série abrégés. Masson, 3ème ed. Paris, 289p.
- Duchaufour Ph., 1993. The FAO-UNESCO soil classification : a reference system based on soil-landscape associations. Arch. Acker-pfl. Boden., 37, 351-362.
- Duchaufour Ph. et Jacquin F., 1966. Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. Bull. de l'ENSAIA. Tome VIII, fasc. I, 1-24.
- Duclos G., 1971. Appréciation de l'aptitude à la mise en valeur des sols de Provence. Bull de l'AFES, n°6, 33-46.
- Driessen P.M. et Dudal R. (eds), 1991. The major soils of the world, lecture notes on their geography, formation, proprieties and use. Agricultural University Wageningen and Katholieke Universitiet Leuven. The Netherlands, 309p.
- Egoumenides C., Piombo G., Servat D. et Marger J.L., 1990. Etude des fractions granulométriques, des fractions organiques de l'azote et du rapport C/N dans un sol ferrallitique cultivé du Brésil. L'Agronomie Tropicale, 45 (2), 145-147.

- Etchevers B.J., Galvis S.A. et Rodriguez J., 1993. Suministro de N edafico y de residuos para los cultivos. In : Gallardo L.J. (ed), "Actas del XII Congreso Latinoamericano de la ciencia del suelo, tomo II". Salamanca, España, 649-657.
- Falisse A., 1992. Recent trends in organic and mineral nitrogen use on arable crops. In : E. François, Pithan E.F. et Bartiaux-Thill (eds), "Nitrogen cycling and leaching in cool and wet regions of Europe (workhop). Gembloux, Belgium, 41-50.
- FAO., 1976. Cadre pour l'évaluation des terres : Bull. Pédologique 32. Food and Agriculture Organization. Rome, 64p.
- FAO., 1980. Improvement and production of maize, sorghum and millet, vol. 2. Food and Agriculture Organization. Rome, 1-164.
- FAO., 1988. Directives : évaluation des terres pour l'agriculture pluviale. Bull. Pédologique 52. Food and agriculture Organization. Rome, 220p.
- FAO., 1989. FAO-Unesco : Carte mondiale des sols, légende révisée. Organisation des nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture. Rapport sur les ressources en sols du monde, n°60. Rome, 125p.
- FAO., 1991. World Soils Ressources. Soils Bull. 66. Food and Agriculture Organization. Rome.
- Feller C., Fritsch E., Poss R. et Valentin C., 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). Cah. ORSTOM, sér. Pédol. vol. XXVI (1), 25-36.
- Fiedler R. et Proksch G., 1975. The determination of nitrogen-15 by emission and mass spectrometry in biochemical analysis : a review. Analytica Chemica Acta, 78, 1-60.
- Flaig W., 1971. Organics compounds in soil. Soil Sci., 111, 19-33.
- Florentin L., 1991. Typologie des sols et appréciation des variations de rendements potentiels pour les grandes cultures (blé, colza). Mémoire Relance Agronomique 6ème cycle. ENSAIA-CRAL. Nancy, France, 122p.
- Florentin L. et Limaux F., 1992. Potentialités agronomiques des sols. Journée Agronomique Alsace-Lorraine. Chambres Régionales d'Agriculture. Brochure, 8p.
- Foy C.D. et Flemming A.L., 1978. The physiology of plant tolerance to excess available aluminum and manganese in acid soils. In : G.A. Jung (ed). "Crop tolerance to suboptimal land conditions". Am. Soc. of Agron. Madison, Wisconsin, 301-328.

- Fredrickson J.K., Koehler F.E. et Cheng H.H., 1982. Availability of ¹⁵N-labelled nitrogen in fertilizer and in wheat straw to wheat in tilled and no-till soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 1218-1222.
- Fried M. et Dean L.A., 1952. A concept concerning the measurement of available soil nutrients. *Soil Sci.*, 73, 263-271.
- Ganry F., 1990. Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Nancy I. France, 355p.
- Gardner W.R., 1965. Movement of nitrogen in soil. In : W.V. Bartolomew et F.E. Clark (eds). "Soil nitrogen" *Agronomy*, 10, 550-572.
- Gliessman S.R., 1982. Nitrogen distribution in several traditional agro-ecosystems in the humid tropical lowlands of south-eastern Mexico. *Plant and Soil*, 67, 105-117.
- Guerrero P.A., Etchevers B.J., Palma-López D. et Rodriguez J., 1990. Mineralización del N organico en diferentes agrosistemas del tropico humedo. In : Memorias del XIII Congreso de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del suelo. Comarca lagunera, México, pp 282.
- Guerrero P.A., Galvis S. A., Etchevers B.J. et Rodriguez J., 1991. Efecto de la variación del N estabilizado sobre agrosistemas del tropico humedo. In : J. Tovar et L. Quintero (eds). "La investigación edafologica en México 1990-1991 : Memorias del XXIV Congreso Nacional de la sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo". Hidalgo, México, pp 291.
- Guiraud G., 1984. Contribution du marquage isotopique à l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organique et minéraux dans le système sol-plante. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie. Paris VI, 335p.
- Guiraud G., 1987. Apports du traçage isotopique à la connaissance d'azote dans les systèmes sol-plantes. *Perspectives Agricoles* n°115 (numéro spécial : Fertilisation azotée et soufrée), 25-32.
- Guiraud G. et Fardeau J.C., 1977a. Dosage par la méthode Kjeldahl des nitrates contenus dans les sols et végétaux. *Ann. Agron.*, 28 (3), 329-333.
- Guiraud G. et Fardeau J.C., 1977b. Organisation et minéralisation de l'azote dans le sol : étude au moyen de l'azote quinze. *Ann. Agron.*, 28(4), 361-378.
- Guiraud G. et Marol Ch., 1982. Utilisation de l'azote 15 en sciences du sol : application à l'étude de transferts d'azote entre les formes minérales et organiques dans un sol calcaire. *Science du sol*, n°2, 125-143.

- Guiraud G. et Boniface R., 1987. Utilisation de l'azote 15 pour les études de transferts d'azote dans le système sol-plante. C.R. Acad. Agric. Fr., 73, 23-38.
- Haider K., Frederick L.R. et Flaig W., 1965. Reaction between amino acid compounds and phenols during oxidation. Plant and Soil, 22, 49-64.
- Hallaire V., 1981. La valeur des terres agricoles : inventaire critique des méthodes d'évaluation. Département des Sols, n°2. INA-PG. Paris, 106p.
- Hamid A. et Ahmad M., 1993. Priming effects of 15 N-labelled ammonium nitrate on uptake of soil N by wheat (*Triticum aestivum* L.) under field conditions. Biol Fertil. Soils, 15, 297-300.
- Hart P.B.S., Rayner J.H. et Jenkinson D.S., 1986. Influence of pool substitution on the interpretation of fertilizer experiments with 15 N. Journal of Soil Science, 37, 389-403.
- Hauck R.D. et Bremner J.M., 1976. Use of tracer for soil and fertilizer nitrogen research. Advances in Agronomy, 28, 219-266.
- Henin S., 1981. Le cycle de l'azote : les problèmes de fertilisation et de pollution. C.R. Acad. Agric. Fr., 10, 846-858.
- Herjean C., 1993. Quel est l'avenir du maïs en France ? Perspectives Agricoles n° 179, 20-25.
- Hervé J.L., 1991. Potentialités des milieux et choix des objectifs de rendement. In : Comifer (ed), "Quelles fertilisations demain ? (Premier forum européen de la fertilisation raisonnée)". Strasbourg, France, 161-167.
- IMTA., 1988. Manual de clasificación, cartografía e interpretación de suelos con base en el sistema de taxonomía de suelos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-SARH. México, 259p.
- INIFAP., 1991. Información sobre las variedades de maíz VS-530 y VS-536. INIFAP-SARH. Brochure, 4p.
- INRA., 1976. Les sols du département de l'Oise. INRA-DDA de l'Oise, France, 333p.
- Jacquin F., 1985. Dynamique de la matière organique en sols cultivés sous climats tempérés. C.R. Acad. Agric. Fr., n°6, 635-642.
- Jacquin F., Haidouti C. et Muller J.C., 1980. Dynamique de la matière organique en sols carbonatés cultivés. Bull de l'AFES., 1, 27-36.

- Jacquin F., Saeed D. et Vong P.C., 1985. Devenir de l'azote fertilisant dans les différents compartiments de la matière organique en sols cultivés. C.R. Acad. Agric. Fr., 71 (7), 643-651.
- Jacquin F. et Florentin L., 1988. Atlas des sols de Lorraine. Presses Universitaires de Nancy, France, 113p.
- Jacquin F. et Vong P.C., 1989. Incorporation of a nitrogen fertilizer in the humified compounds of a Typic hapludalfs. The Science of the Total Environment, 81/82, 465-469.
- Jacquin F. et Vong P.C., 1990. Quantification des mécanismes d'organisation et de minéralisation de l'azote en sols cultivés. Science du Sol, 28 (4), 349-362.
- Jacquin F., Chéloufi H., Sulçe S. et Vong P.C., 1991. Cinétique d'immobilisation d'un engrais azoté : conséquences agronomiques et environnementales. In : F.U.L. (ed), "Gestion de l'azote agricole et qualité des eaux (séminaire organisé par la fondation Universitaire Luxembourgeoise)". Arlon, Belgique, 209-223.
- Jacquin F., Chéloufi H. et Vong P.C., 1992. Immobilization and mineralization kinetics of a nitrogen fertilizer in calcareous clayey soil (rendzina). The Science of the Total Environment, 117/118, 271-278.
- Jacquin F., Florentin L. et Limaux F., 1993. Pour une gestion de l'exploitation agricole respectueuse de l'environnement. C.R. Acad. Agric. Fr., 79 (5), 51-59.
- Jacquin F., Palma-López D., Sulce S. et Vong P.C., 1994. Incorporation of mineral and organic nitrogen fertilizers into different organic fractions of cultivated soils. The Science of the Total Environment (sous presse), 6p.
- Jamagne M., 1967. Bases et Techniques d'une cartographie des sols. Ann. Agron., 18 (n° hors série), 142p.
- Jamagne M., 1979. La cartographie des sols. In : M. Bonneau et B. Souchier (eds), "Pédologie 2 : constituants et propriétés du sol". Masson, Paris, 419-439.
- Jansson S.L., 1958. Tracer studies on nitrogen transformation in soil with special attention to mineralization-immobilization relationships. Kugl. Lantbr. Ann., 24, 101-361.
- Jansson S. et Persson J., 1982. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. In : F.J. Stevenson (ed), "Nitrogen in agricultural soils", 229-252.
- Jenkinson D.S., Fox R.H. et Rayner J.H., 1985. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen - the so-called "priming" effect. Journal of Soil Science, 36, 425-444.

- Kai H., 1975. The immobilization and release of nitrogen in soil and the chemical characteristics of nitrogen in those processes. In : H. Takahashi (ed). "Nitrogen fixation and nitrogen cycle". Japanese committee for the International Biological Program, Vol. 12, Tokyo, 95-105.
- Kee Kwong K.F., Deville J., Cavalot P.C. et Rivière V., 1986. Biological immobilization of Fertilizer nitrogen in humid tropical soils of Mauritius. *Soil Science*, 141 (3), 195-199.
- Kickuth R. et Scheffer F., 1976. Konstitutive und nutritive ergenschaften des sogenannten pseudo-amidstick-stoffs aus humisaüren. *Agrochimica*, XX, 376-386.
- Klingebiel A.A. et Montgomery P.H., 1961. Land capability classification. U.S. dep. Agric., Handb. Agric. 210. Washington, USA, 210p.
- Koller R., 1991. Maîtrise de la fertilisation azotée en Alsace : de l'échelle régionale à la parcelle cultivée. In : Comifer (ed), "Quelles fertilisations demain ? (premier Forum Européen de la fertilisation raisonnée)". Strasbourg, France, 145-146.
- Koller R., 1992. Maîtriser la fertilisation azotée pour réduire les charges et respecter l'environnement. Journée Agronomique Alsace-Lorraine, Chambres Régionales d'Agriculture, Sarrebourg, France, brochure, 6p.
- Lafleuriel P., 1990. La mesure de l'azote minéral dans le sol. *Perspectives Agricoles* n°144, 66-71.
- Lafrechoux M. et Collaborateurs., 1983. Carte des sols de la Région Centre 1/50 000 : Selles-sur-Cher (notice explicative). Chambre d'Agriculture de l'Indre, France, 165p + annexes + cartes.
- Legg J.O. et Stanford G., 1967. Utilization of soil and fertilizer N by oats in relation to the available N status of soils. *Soil Sci. Soc Am, Proc.*, 31, 215-219.
- Limaux F., 1985. les facteurs de variation du rendement du blé en Lorraine : influence des différentes composantes et du milieu sol-climat. Mémoire Relance Agronomique. Nancy, France, 64p + annexes.
- Limaux F., 1988. Potentialités parcellaires. In : Comifer (ed), "3e Forum national de la fertilisation raisonnée". Nancy, France, 27-31.
- Limaux F., 1991. Adaptation de la fertilisation azotée à des systèmes céréaliers moins intensifs. In : Comifer (ed), "Quelles Fertilisations demain ? (Premier Forum Européen de la fertilisation azotée)". Strasbourg, France, 168-178.

- Limaux F., 1994. Les facteurs de variation du Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote engrais. Mémoire pour obtenir le Diplôme de Thèse : ENSAIA-INPL. Nancy, France, 114p + annexes.
- Limaux F., Aubry Ch., Bourzeix A. et Constant J.B., 1993. Fertilisation du blé en Lorraine : constats et propositions pour de nouvelles pratiques. Perspectives Agricoles n°179, 58-66.
- Lozet J. et Mathieu C., 1990. Dictionnaire de science du sol. Technique et documentation-Lavoisier, 2ème ed., Paris , 384p.
- Machet J.M., Pierre D., Recous S. et Remy J.C., 1987. Signification du Coefficient Réel d'Utilisation et conséquences pour la fertilisation azotée des cultures. C.R. Acad. Agric. Fr., 73(3), 39-55.
- Machet J.M., et Mary B., 1990. Etude des différentes successions culturales sur les risques de pertes en nitrates en région de grande culture. In : R. Calvet (ed), "Nitrates-agriculture-eau". INRA éditions, Paris, 395-403.
- Marin-Laflèche A., 1972. Les classements de terrains. Ann. Agron. 23(1), 5-30.
- Martin F., Maudinas B., Chemardin M. et Gadal P., 1981. Preparation of submicrogram nitrogen samples for isotope analysis by the GS1 emission spectrometer. IJARI., 32, 215-217.
- Marumoto T., Shindo H. et Higashi T., 1980. Effects of carbonaceous materials on the accumulation of readily mineralizable organic nitrogen in soil. Soil Sci. Plant Nutr., 26 (2), 185-190.
- Massé J., 1989. Les potentiels des céréales : méthodologie d'étude. Perspectives Agricoles Cariopse, 12-15.
- McTaggart I.P. et Smith K.A., 1993. Estimation of potentially mineralisable nitrogen in soil by KCl extraction. II, comparaison with soil N uptake in the field. Plant and soil, 157, 175-184.
- Meyer C., Hirel B., Morot-Gaudry J-F. et Caboche M., 1993. L'utilisation de l'azote par les plantes. La Recherche, 24, 956-962.
- Morel R., 1989. Les sols cultivés. Technique et Documentation-Lavoisier. Paris, 373p.
- Myers R.J.K., 1975. Temperature effects on ammonification and nitrification in a tropical soil. Soil Biol. Biochem., 7, 83-86.
- Nicolardot B., Fauvet G. et Cheneby D., 1994. Carbon and nitrogen cycling through soil microbial biomass at various temperatures. Soil Biol. Biochem., 26(2), 253-261.

- Nicolardot B. et Molina A.E., 1994. C and N fluxes between pools of soil organic matter : model calibration with long-term field experimental data. *Soil Biol. Biochem.*, 26 (2), 245-251.
- Nommik H., 1981. Fixation and biological availability of ammonium in soil clay minerals. In : F.E. Clark et T. Rosswall (eds), "Terrestrial nitrogen cycles". *Ecology Bulletin*. Stockholm, 33, 273-279.
- Olfs H.W. et Werner W., 1992. Suitability and limitations of different soil N fractions for the improvement of N fertilization recommendation to winter wheat. In : E. François., K. Pithan et N. Bartiaux-Thill (eds). "Nitrogen cycling and leaching in cool and wet regions of Europe (Workshop)". Gembloux, Belgium, 53-54.
- Olson R.V., 1980. Fate of tagged nitrogen Fertilizer applied to irrigated corn. *Soil Sci. Soc. Am J.*, 44, 541-517.
- Onnis C., 1990. Etude du fractionnement des apports d'azote sur la culture du maïs. rapport de BTS Productions Végétales, 19p.
- Palma-López D., 1994. Genesis y taxonomía de los suelos de aluvión reciente en la ribera del Río Seco. In : S.M.C.S. (ed), "Memorias del XVII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo". Guadalajara, México, pp 64.
- Palma-López D., 1985a. Correlación de las series de suelos del estado de Tabasco, México. Tesis de "Master of Science" especialidad Suelos Tropicales. CSAT-SARH. Tabasco, México, 275p.
- Palma-Lopez D., 1985b. Genesis y clasificación de los suelos de Tabasco. In: Depto. de Suelos (ed), "Los suelos de Tabasco". CSAT-SARH. Tabasco, México, 3-12.
- Palma-López D., 1991. Apports de la cartographie des sols pour l'évaluation des potentialités agronomiques : application au secteur du Barrois. Mémoire de DEA Sciences Agronomiques. ENSAIA-INPL. Nancy, France, 104p.
- Palma-López D., Cisneros D.J., Trujillo N.A., Granados A.N. et Serrano B.E, 1985. Caracterización de los suelos de Tabasco (Uso actual, potencial y taxonomía). SECUR - Gobierno del Estado de Tabasco, México, 40p + cartes.
- Palma-López D., Florentin L. et Jacquín F., 1993. Determinación del Coeficiente Real de Utilización de un fertilizante nitrogenado en suelos cultivados con maíz del Noreste de Francia. In : J. Gallardo (ed), "Actas del XII congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, vol II". Salamanca, España, 775-782.
- Persson J., 1981. Influence of mineral and organic fertilizers on the humus balance and humus formation. In : P. Dutil et F. Jacquín (eds), "Colloque humus et azote". INRA-ENSAIA. Reims, France, 82-87.

- Pieri C., 1989. Fertilité des terres de savanes bilan de trente ans de recherche et du développement agricoles au Sud du Sahara. Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT. Documentation française. Paris, 444p.
- Plas D., 1992. Adaptation régionale du raisonnement de la fertilisation azotée : cas du blé tendre en AUNIS. Thèse U.T.C. France, 174p.
- Plet P., 1988. Réflexions sur les potentialités du milieu : un paramètre important, le sol. In : Agronomie Action Barrois Bourgogne (ed), "Les terres à cailloux des plateaux calcaires du Barrois et de Bourgogne". Chaumont, France, 6-10.
- Recous S., 1983. Utilisation réelle de l'engrais azoté par une culture de blé ; 4 années d'expérimentation avec ^{15}N INRA-ITCF document multigraphié. France, 57p.
- Recous S., 1988. Dynamique de l'azote en sol cultivé : organisation microbienne des formes ammoniacale et nitrique, conséquences sur l'utilisation de l'azote des engrais par une culture de blé. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I, France, 189p.
- Recous S., Fresneau C., Faurie G. et Mary B., 1988a. The fate of labelled ^{15}N urea and ammonium nitrate applied to a winter wheat crop. I. Nitrogen transformations in the soil. *Plant and Soil*, 112, 205-214.
- Recous S., Machet J.M. et Mary B., 1988b. The fate of labelled ^{15}N urea and ammonium nitrate applied to a winter wheat crop. II. Plant uptake and N efficiency. *Plant and Soil*. 112, 215-224.
- Recous S., Mary B. et Faurie G., 1990. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in cultivated soils. *Soil Biol. Biochem.*, 22 (7), 913-922.
- Recous S., Machet J.M. et Mary B., 1992. The partitioning of fertilizer-N between soil and crop : comparison of ammonium and nitrate applications. *Plant and Soil*, 144, 101-111.
- Reiniger P., Hutson J., Jansen H., Kragt J., Piehler H., Swarts M. et Vereecken H., 1991. Evaluation and testing of models describing nitrogen transport and transformation in soil : a european project. In : Comifer (ed), "Quelles fertilisations demain ? (Premier Forum Européen de la Fertilisation raisonnée)". Strasbourg, France, 224-229.
- Remy J.C. et Hebert J. 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 11, 700-714.

- Remy J.C. et Viaux Ph., 1983. La Fertilisation azotée du blé tendre en système intensif en France. Perspectives Agricoles n°67, 26-34.
- Riquier J., 1971. The parametric method of land evaluation. Food and Agriculture Organisation. Rome.
- Rondeau M. et Palma-López D., 1991. Etude pédologique du secteur de références du Barrois. ENSAIA-INPL et CRAL. Nancy, France, 105p + cartes.
- Rondeau M. et Palma-López D., 1992. Etude pédologique des secteurs de références des Vosges (Montagne Centre et la Vôge). ENSAIA-INPL et CRAL. Nancy, France, 86p + cartes.
- Ruselle M.P., Deibert E.J., Hauck R.D., Stevanovic M. et Olson R.A., 1981. Effects of water and nitrogen management on yield and ¹⁵N- depleted fertilizer use efficiency of irrigated corn. Soil Sci. Soc. Am. J.;, 45, 553-558.
- Sanchez P.A., 1976. Properties and management of soil in the tropics. Wiley. New-York, 619p.
- Sanchez P.A. et Miller R.H., 1986. Organic matter and soil Fertility management in acid soils of the tropics. In : ISSS (ed), "Proceedings of the XIII Congress of the International Society of Soil Science, volume VI". Hambourg, 609-625.
- Sanchez P.A, Couto W. et Buol S.W., 1982. El sistema de clasificar suelos de acuerdo con su fertilidad : interpretación, aplicaciones y modificaciones (traducción del ingles). Geoderma, 27, 283-309.
- SARH., 1991. Indicadores de la producción agricola en Tabasco. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidraulicos. Mimiografiado, 10p.
- Schnitzer M., 1981. Toward a better understanding of the interrelationship between humus and nitrogen : a key economic and scientific problem in international agriculture. In : P. Dutil et F. Jacquin (eds), "Colloque humus et azote". INRA-ENSAIA, Reims, France, 1-15.
- Schnitzer M. et Hindle D.A., 1980. Effect of paracetic acid on N-containing components of humic materials. Can. Soil Sci., 60, 541-548.
- Schnitzer M. et Hindle D.A., 1981. Effect of different methods of acid hydrolysis on the nitrogen distribution in two soils. Plant and Soil, 60, 237-243.
- Sébillotte M., 1989. Fertilité et systèmes de production : essai de problématique générale. In : M. Sébillotte (ed), Fertilité et systèmes de production". INRA éditions. Paris, 13-57.

- Sébillotte M. et Meynard J.M., 1990. Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées. In : R. Calvet (ed), "Nitrates-agriculture-eau". INRA éditions. Paris, 289-312.
- Shen S. M., Hart P.B.S., Powlson D.S. et Jenkinson D.S., 1989. The nitrogen cycle in the Broadbalk wheat experiment : ^{15}N -labelled fertilizer residues in the soil and in the soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 21 (4), 529-533.
- Siband P., 1989. De la connaissance des terres et des climats à la recommandation agronomique. In : Orstom (ed). "Soltrop 89 (Actes du premier Séminaire Franco-Africain de Pédologie Tropicale)". ORSTOM. Paris, 283-305.
- Sinaj S., 1990. Apports de la cartographie des sols pour l'évaluation des potentialités agronomiques : application au secteur de Lunéville. Mémoire de DEA Sciences Agronomiques. ENSAIA-INPL. Nancy, France, 70 p.
- Soil Survey Staff, 1975. Soil taxonomy : a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA, Handbook n°436. Washington, D.C., 754p.
- Soil Survey Staff, 1986. Clés de la taxonomie des sols (traduction de l'anglais). Monographie technique n°13, SMSS. Ithaca, New-York, 280p.
- Soil Survey Staff, 1992. Keys to soil taxonomy. SMSS technical monograph n°19, 5 th edition. Pocahontas Press. Inc. Blacksburg, Virginia, 556p.
- Sorensen L.H., 1982. Mineralization of organically bound nitrogen in soil as influenced by plant growth and fertilization. *Plant and Soil*, 65, 51-61.
- Stanford G. et Smith S.J., 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36, 465-472.
- Stanford G., Legg J.O. et Smith S.J., 1973. Soil nitrogen availability evaluations based on nitrogen mineralization potentials of soils and uptake of labelled and unlabelled nitrogen by plants. *Plant and Soil*, 39, 118-124.
- Stewart B.A., Porter L.K. et Johnson D.D., 1963. Immobilization and mineralization of nitrogen in several organic fractions of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 27, 302-304.
- Storie R.E, 1976. Storie index soil rating. In : Spec. Publ. SW. Agric. Sci. University of California n°3203.

- Sulçe S., 1993. Etude du potentiel de minéralisation et du devenir de fertilisants azotés minéraux dans les sols cultivés de la région Myzeque (Albanie). Thèse de Doctorat INPL. Nancy, France, 107p.
- Tardieu F., 1988. Cartographie in situ du système racinaire. Perspectives Agricoles n°122, 19-22.
- Taureau J.C., 1987. Approche de l'offre en azote du milieu par les expérimentations au champ. C.R. Acad. Agric. Fr., 73,81-90.
- Thierry J., 1986. Potentialités du maïs ensilage en Lorraine (influence des facteurs du milieu : sol-climat). Mémoire de Relance Agronomique. Chambre d'Agriculture de la Meuse. France, 105p.
- Trujillo N.A. et Palma-López D., 1990. Estudio agrologico detallado del campo experimental del Ceicades. Ceicades-Colegio de Postgraduados. Tabasco, México, 148p + cartes.
- Turin A., 1991. La pollution des eaux souterraines en Lorraine, le cas des nitrates. Thèse de Doctorat de troisième cycle. Université de Nancy II, UFR de géographie. France, 266p.
- Vinten A.J.A. et Smith K.A., 1993. Nitrogen cycling in agricultural soils. In : T.P. Burt, A.L. Heathwaite et S.T. Trudgill (eds). "Nitrate : processes, patterns and management". Wiley, Chinchester, England, 39-74.
- Vitousek P.M. et Matson P.A., 1988. Nitrogen transformation in a range of tropical forest soils. Soil Biol. Biochem., 20 (3), 361-367.
- Volke H.V. et Garcia-Morin A., 1993. Recomendaciones de fertilización de cultivos con base en un enfoque integral. In : J. Gallardo L. (ed), "Actas del XII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, vol II". Salamanca, España, 848-854.
- Vong P.C., 1987. Contribution à l'étude cinétique des différents compartiments azotés contenus dans les sols cultivés après apports de fertilisants minéraux et organiques. Thèse de Doctorat d'Etat, INPL. Nancy, France, 217p.
- Vong P.C., Kabibou I. et Jacquin F., 1981. Contribution à la caractérisation des différentes formes d'azote dans quatre types de sols cultivés. In : P. Dutil et F. Jacquin (eds). "Colloque humus et azote". INRA- ENSAIA. Reims, France, 99-106.
- Vong P.C., Bouchama J. et Jacquin F., 1989. Contribution à l'étude du potentiel de minéralisation de l'azote en sol cultivés Lorrains. Science du Sol, 27, 215-226.

- Vong P.C. et Jacquin F., 1989. Cinétique de réorganisation et de reminéralisation secondaire d'un engrais azoté apporté à un sol brun lessivé. C.R. Acad. Agric. Fr., 75 (1), 43-49.
- Wayne R.P., 1993. Nitrogen and nitrogen compounds in the atmosphere. In : T.P. Burt, A.L. Heathwaite et S.T. Trudgill (eds), "Nitrate : processes, patterns and management". Wiley, Chinchester, England, 23-38.
- Wetselaar R. et Ganry F., 1982. Nitrogen balance in tropical agrosystems. In : Y.R. Dommergues et H.G. Diem (eds), "Microbiology of tropical soils and plant productivity". Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers. The Hague, 1-36.
- Wickramasinghe K.N., Rodgers G.A. et Jenkinson D.S., 1985. Transformations of nitrogen Fertilizers in soil. Soil Biol. Biochem., 17 (5), 625-630.
- Zapata F., 1990. Isotope techniques in soil fertility and plant nutrition studies. In : G. Hardarson (ed). "Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships". Training course series n°2. IAEA. Vienna, 61-128.

ANNEXES

PROFIL n° 7 : FLUVIOSOL TYPIQUE

Appellation locale : "sol alluvial" "sol de vallée"

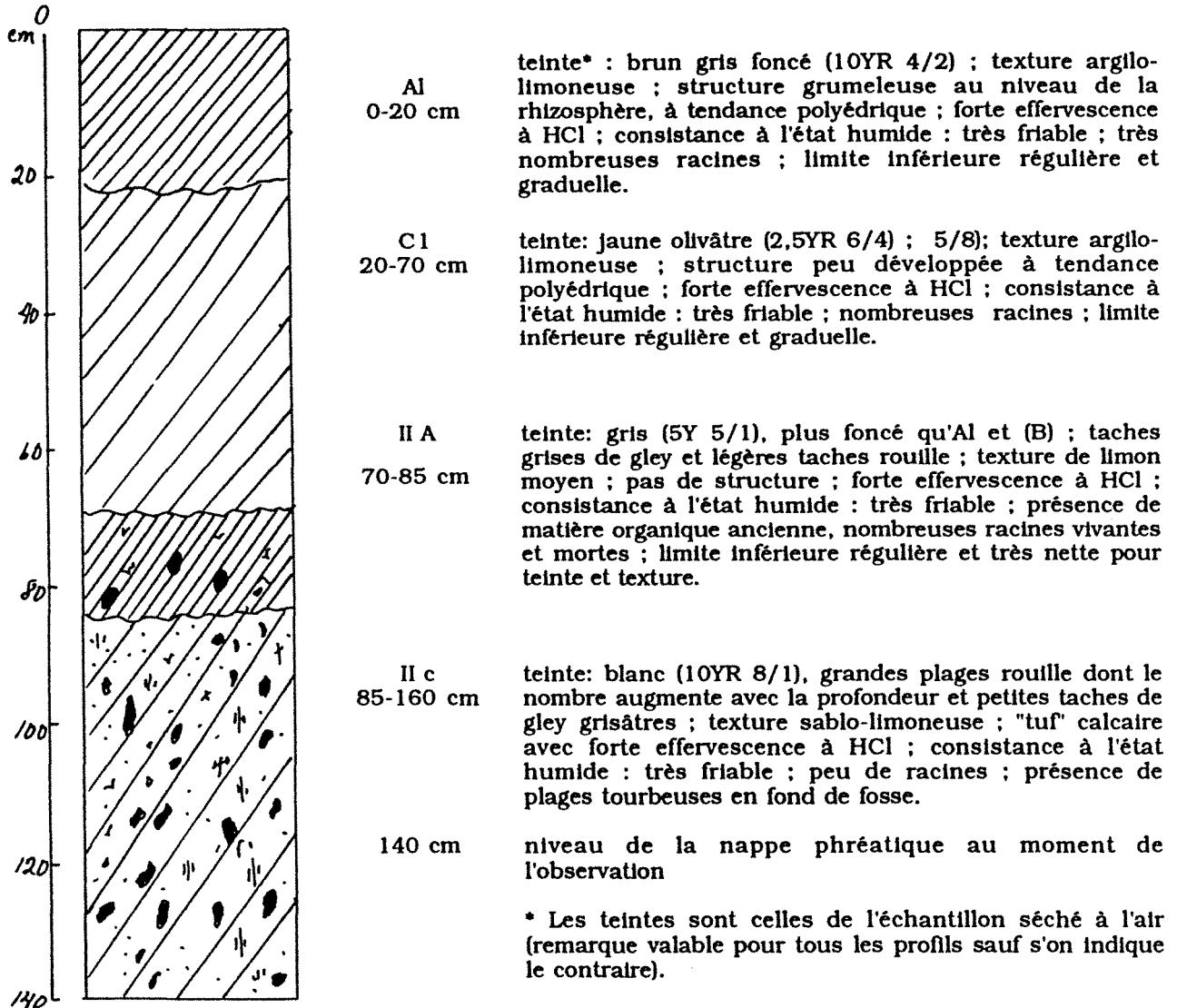
Roche mère : alluvions récentes de la vallée de l'Aire

Topographie : plane

Végétation : peupleraie de 3-4 ans

Localisation : Courcelles-sur-Aire

Coordonnées Lambert I : x = 812,2 y = 1141,2 z = 233 m



Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					CaCO ₃ %		MO %	N %	C/N	PH		P ₂ O ₅ %		Bases échangeables meq/100			
		A	LF	LG	SM	SG	actif	total				eau	KCl	J-H	Olsen	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺
Ap	0-20	39,12	29,47	17,30	2,62	2,61	13,0	21,0	3,68	0,27	7,89	7,8	7,1	0,06	0,03	51,4	1,19	0,55	0,06
C1	20-70	38,37	34,05	15,88	4,69	4,28	16,2	33,1	2,73	0,21	7,42	8,2	7,3	0,01	-	45,0	0,35	0,32	0,06
II A	70-85	27,49	32,8	9,84	10,46	17,15	19,2	70,0	2,26	0,11	11,6	8,3	7,7	0,03	-	33,7	0,15	0,11	0,06
II C2	85-160	25,00	19,78	10,52	15,31	28,34	13,9	66,5	1,05	0,05	11,3	8,4	8,0	0,02	-	32,2	0,10	0,02	0,03

Hor	CEC meq/100g	S/T	Al. ech meq/100g	Fer %	Dap gr/cm ³	C.C. %	P.F. %
Ap	31,5	sat.*	0,1	12,5	0,72	41	31
C1	19,5	sal.	-	-	1,19	30	20
II A	8,8	sat.	-	-	-	40	15
II C2	2,0	sat.	-	-	-	52	20

* sat = saturé

- sol carbonaté ; pH basique
- forte teneur en matière organique
- très faible teneur en phosphore (pas d'apports réguliers, entraînement par les eaux de la nappe)
- très bonne capacité d'échange
- complexe adsorbant saturé par l'ion Ca⁺⁺, bien pourvu en Mg⁺⁺, teneur faible en K⁺

PROFIL n° 9 : RENDOSOL

Appellation locale : "terre à cailloux"

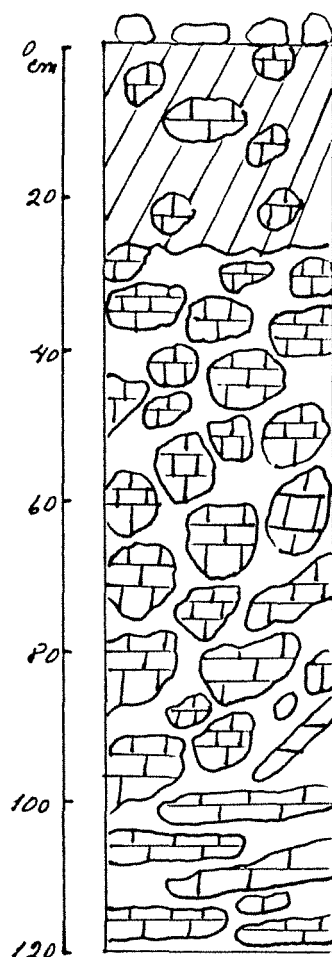
Roche mère : bancs calcaires et marno-calcaires du Kimméridgien inférieur.

Topographie : replats (pente inférieure à 5%)

Végétation : chaume (orge d'hiver)

Localisation : Chaumont-sur-Aire

Coordonnées Lambert I : x = 815,500 y = 1140,500 z = 270 m

Ap
0-25 cm

teinte : gris brun (10 YR 5/2) ; texture argilo-limoneuse ; structure grumeleuse bien développée ; cailloux de taille déci- et centimétrique abondants (\pm 30% en poids) ; consistance à l'état humide : friable ; forte effervescence à HCl ; abondantes petites racines ; transition irrégulière et graduelle avec C₁.

C₁
25-55 cm

teinte : beige foncé (10YR 6/4) ; trace d'hydromorphie sous forme de petites taches jaune ocre (10 YR 7/6) ; texture argilo-limoneuse ; structure massive ; cailloux très abondants (\pm 60% en poids), de taille décimétrique et intimement mêlés à la matrice argileuse (terra fusca + marnes) ; forte effervescence à HCl ; rares petites racines ; transition régulière et progressive avec C₂.

C₂
55-90 cm

Assez similaire à C₁ mais : teinte beige (10 YR 7/4) ; il n'y a plus de racines et les taches d'hydromorphie sont plus prononcées.

R
+ 90 cm

Roche mère calcaire disposée sous forme de couches horizontales avec un matériau marno-calcaire.

Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					CaCO ₃ %		MO %	N %	C/N	PH		P ₂ O ₅ ‰	Bases échangeables meq/100				CEC meq/100g	S/T
		A	LF	LG	SM	SG	actif	total				eau	KCl		J-H	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺		
Ap	0-25	35,6	38,5	10,6	3,8	11,5	12,9	37,4	3,34	0,23	8,47	8,2	7,4	0,19	44,4	0,76	1,18	0,03	14,8	sat*
C ₁	25-55	35,2	40,4	7,2	3,5	13,7	19,3	56,8	1,17	0,09	7,31	8,4	7,4	0,01	42,6	0,70	0,67	0,03	10,9	sat.
C ₂	55-90	36,2	48,2	7,4	3,1	5,1	28,2	58,2	0,46	0,04	6,92	8,5	7,4	-	41,3	0,56	0,22	0,04	7,5	sat.

Hor	Dap g/cm ³	C.C. %	P.F. %
Ap	1,1	25	14
C ₁		26	14
C ₂		26	16

* sat = saturé

- taux satisfaisant en matière organique
- teneur un peu faible en phosphore
- bonne capacité d'échange
- complexe adsorbant dominé par Ca⁺⁺ et bien pourvu en K⁺ et en Mg⁺⁺

PROFIL n° 4 : CALCOSOL

Appellation locale : "sol à oreilles de souris"

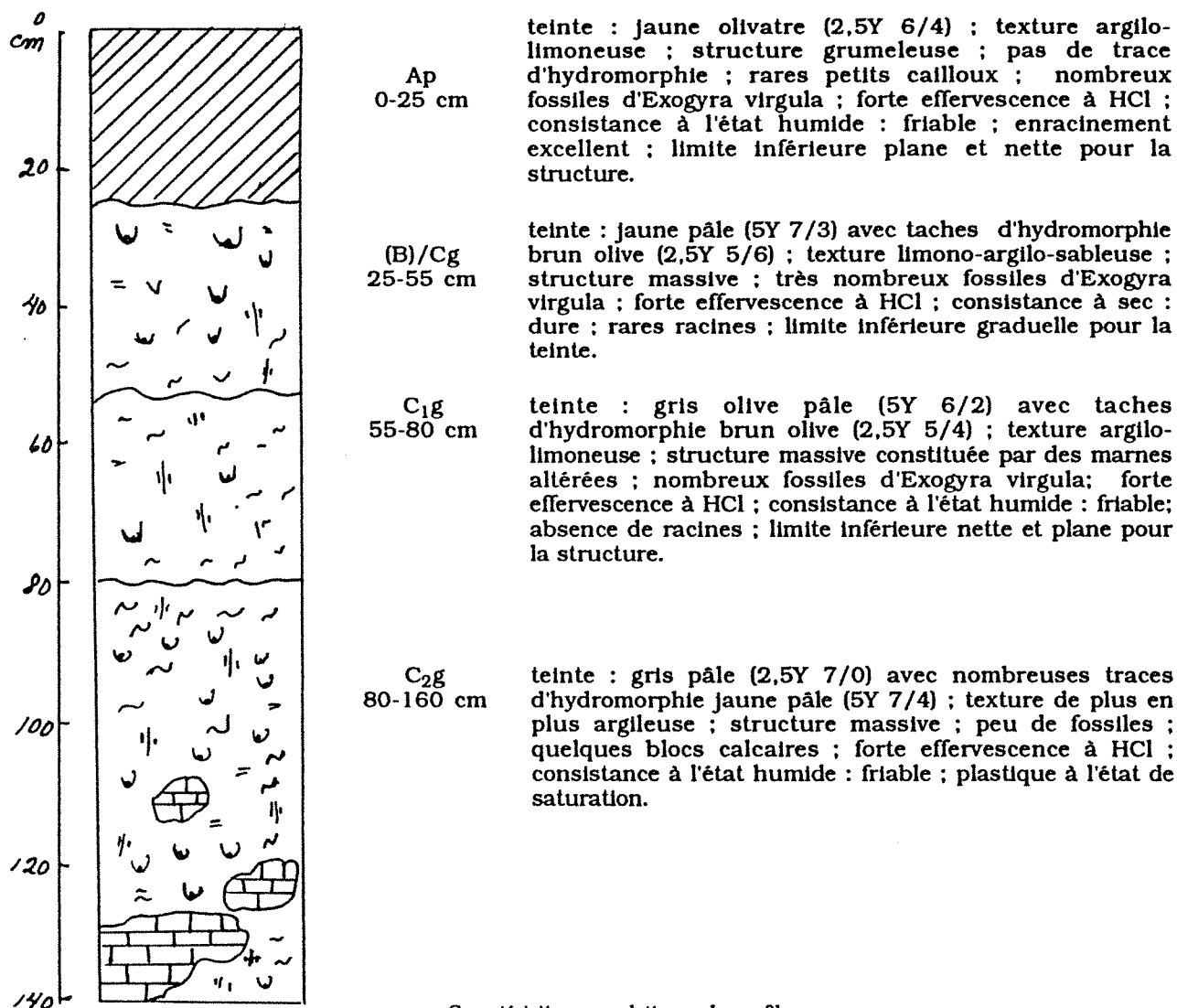
Roche mère : Marnes du Kimméridgien supérieur et moyen.

Topographie : coteau à pente moyenne (8-12%)

Végétation : orge d'hiver

Localisation : Chaumont-sur-Aire

Coordonnées Lambert I : x = 814,5 y = 1141,2 z = 270 m

surface fissurée (1 à 2 cm) avec de nombreux fossiles d'*Exogyra virgula*

Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					CaCO ₃ %		MO %	N %	C/N	PH		P ₂ O ₅ ‰		Bases échangeables meq/100			
		A	LF	LG	SM	SG	actif	total				eau	KCl	J-H	Olsen	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺
Ap	0-25	29,82	33,1	12,59	4,32	17,66	13,9	42,3	2,51	0,18	8,24	8,0	7,3	0,19	0,11	36,8	0,74	0,59	0,06
(B)/Cg	25-55	26,84	34,39	14,41	3,24	20,62	14,2	50,9	0,50	0,04	7,65	8,5	7,6	0,03	-	34,5	0,89	0,28	0,03
C _{1g}	55-80	35,14	33,65	9,43	3,81	17,56	14,2	48,0	0,41	0,03	7,45	8,5	7,6	0,01	-	34,7	1,30	0,28	0,03
C _{2g}	80-160	33,15	53,53	7,43	1,79	3,65	15,5	56,9	0,45	0,03	9,69	8,5	7,7	0,01	-	33,3	2,38	0,32	0,06

Hor	CEC meq/100g	S/T	Al. ech meq/100g	Fer ‰	Dap gr/cm ³	C.C. %	P.F. %
Ap	12,9	sat.*	0,1	8,4	1,58	26	14
(B)/Cg	7,6	sat.	-	-	1,74	22	13
C _{1g}	6,3	sat.	-	-	-	26	16
C _{2g}	7,2	sat.	-	-	-	26	16

* sat = saturé

- sol carbonaté : pH alcalin
- teneur un peu faible en matière organique
- teneur satisfaisante en phosphore
- capacité d'échange moyenne
- complexe adsorbant dominé par Ca⁺⁺ et bien pourvu en Mg⁺⁺ et K⁺ (teneur élevée)

PROFIL n° 3 : CALCISOL

Appellation locale : "terre rouge"

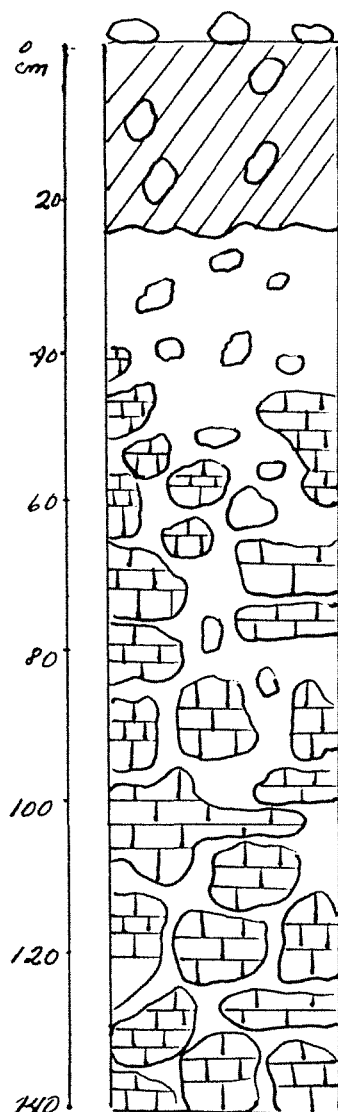
Roche mère : bancs calcaires à débris du Portlandien inférieur

Topographie : plane

Végétation : maïs

Localisation : Rembercourt-aux Pots

Coordonnées Lambert I : x = 810,9 y = 1139,7 z = 307,5 m

Ap
0-25 cm

teinte : jaune olivâtre (2,5Y 6/4) ; texture argillo-limoneuse ; structure générale polyédrique mais grumelleuse par endroits (granulation d'origine biologique) ; cailloux très rares (taille centimétrique) ; pas d'effervescence à HCl ; consistance à l'état humide : friable à tendance ferme ; paille de céréale enfouie en voie de décomposition ; transition nette et plane avec (B).

(B)
25-60
(40-70) cm

teinte : brun franc (7,5Y 5/8) avec taches plus foncées (coloration par des substances humiques) ; texture argileuse ; structure polyédrique et prismatique plus développées que dans l'horizon Ap avec facettes de glissement ; pas d'hydromorphie ; pas d'effervescence à HCl ; consistance à l'état humide : ferme ; traces d'anciennes racines ; limite inférieure très sinueuse.

C
60(40-70)
-150 cm

teinte de la terra fusca : brun franc (7,5YR 4/6) ; du calcaire décomposé : jaune (2,5Y 7/6) ; texture argileuse ; sans structure ; pas d'hydromorphie ; mélange de cailloux de toutes tailles avec une matrice comportant à la fois de l'argile et du calcaire décomposé ; consistance à l'état humide : ferme (terra fusca) et friable (poudre calcaire) ; très légère effervescence à HCl ; quelques traces d'anciennes racines de petite taille.

R
+ 150 cm

calcaire dur avec une pellicule d'altération à la surface.

Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					CaCO ₃ %		MO %	N %	C/N	PH		P ₂ O ₅ %		Bases échangeables meq/100			
		A	LF	LG	SM	SG	aclif	total				eau	KCl	J-H	Olsen	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺
Ap	0-25	43,84	22,51	24,57	3,93	2,62	-	0,48	2,53	0,19	7,82	7,4	6,7	0,23	0,15	22,6	0,59	0,78	0,10
(f)	25-60	66,25	18,49	11,23	1,3	1,47	0	0,84	1,26	0,12	6,21	8,0	6,8	0,05		41,0	0,94	0,59	0,06
C	60-150	50,84	31,61	12,53	1,72	2,48	15,5	23,9	0,82	0,08	6,36	8,2	7,1	0,01		40,3	0,5	0,32	0,10

Hor	CEC meq/100g	S/T	Al. ech meq/100g	Fer %	Dap. gr/cm ³	% cailloux (> 2 cm)**	% gravier (2 cm - 2 mm)**	% terre fine (< 2 mm)**	C.C. %	P.F. %
Ap	19,3	sat*	0,2	22,9	1,30	2,24	0,9	96,86	26	15
(f)	29,6	sat.	-	-	1,32	-	-	-	42	27
C	19,3	sat.	-	-	-	-	-	-	36	22

* sat = saturé

** % par rapport au poids total de la terre fraîche

- pH légèrement alcalin
- teneur faible en matière organique
- taux satisfaisant en phosphore
- bonne capacité d'échange
- complexe adsorbant dominé par Ca⁺⁺ et bien pourvu en Mg⁺⁺ et K⁺

PROFIL n° 1 : NEOLUVISOL

Appellation locale : "terre blanche"

Roche mère : Limons "éoliens" et calcaires du Portlandien

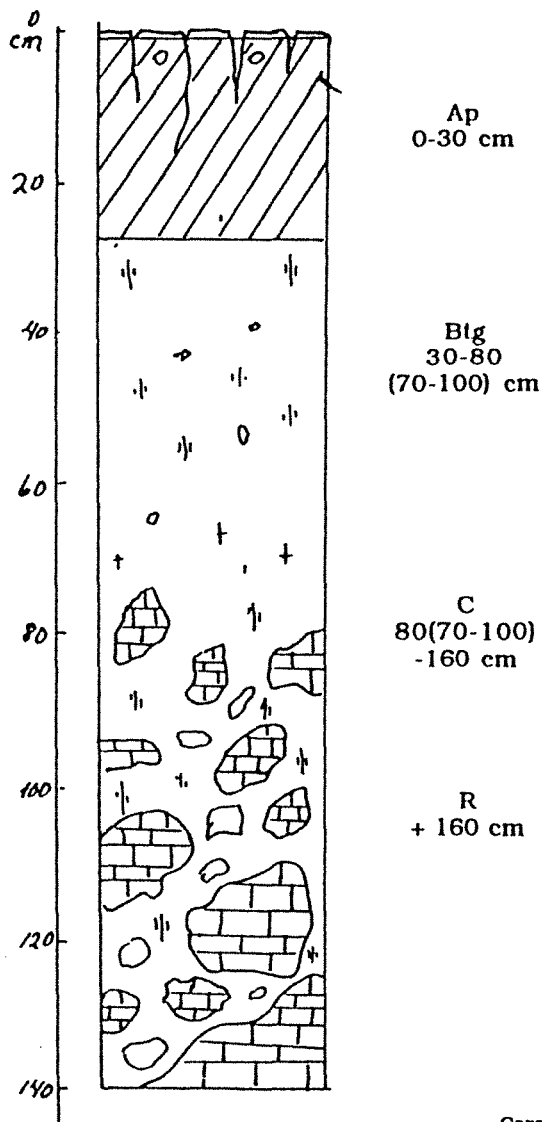
Topographie : plane avec pente très légère

Végétation : orge d'hiver

Localisation : Erize-la-Petite

Coordonnées Lambert I : x = 811,3 y = 1138,7 z = 305 m

sol fissuré, petite croûte de battance en surface



teinte : jaune (2,5Y 7/6) ; texture limono-argileuse ; structure peu développée en blocs avec par endroits granulation d'origine biologique ; petits cailloux très rares ; bonne activité biologique (galeries de vers de terre entre autre), très nombreuses racines fines ; résidus enfouis de récolte ; pas d'effervescence à HCl ; consistance à sec : friable ; transition (structure et texture) suivant une limite plane et nette avec Btg.

teinte : jaune pâle (2,5Y 7/4) avec petites taches brun jaune clair (10YR 6/8) ; texture argilo-limoneuse à tendance argileuse ; structure polyédrique à tendance prismatique (prismes de 10 cm de large, facettes de glissement bien visibles) ; taches d'hydromorphie de plus en plus nombreuses avec la profondeur (marmorisation) ; consistance à l'état humide : ferme ; racines jusqu'à 1m empruntant de préférence les fissures et galeries de vers ; pas d'effervescence à HCl ; transition progressive et sinieuse avec C.

teinte : jaune olivâtre (2,5Y 6/4) ; mélange de cailloux de calcaires lithographiques et calcaires lumachelliques avec de l'argile ; nombreuses taches d'hydromorphie ; consistance à l'état humide : ferme ; quelques racines qui descendent jusqu'à 1,20m.

dalle calcaire très dure et fissurée, fossilifère

Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					CaCO ₃ %		MO %	N %	C/N	PH		P ₂ O ₅ ‰		Bases échangeables meq/100			
		A	LP	LG	SM	SG	actif	total				eau	KCl	J-II	Olsen	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺
Ap	0-30	20,68	36,33	35,92	3,74	1,27	0	0	2,06	0,13	9,28	6,6	5,6	0,10	0,07	6,6	0,4	0,47	0,10
B2t	30-80	57,36	24,25	15,37	1,92	0,26	0	0	0,84	0,08	6,51	7,6	6,4	0,02	-	22,3	0,64	0,53	0,03
C	80-160	55,67	28,08	13,61	1,35	0,90	7,10	11,9	0,39	0,05	4,20	8,2	7,1	0,03	-	42,8	0,50	0,40	0,10

Hor	CEC meq/100g	S/T	Al. ech meq/100g	Fer ‰	Dap g/cm ³	C.C. %	P.F. %
Ap	10,2	93,8	0	1,49	1,36	25	9
B2t	21,1	sat.*	-	-	1,48	34	20
C	16,5	sat.	-	-	-	33	21

* sat = saturé

- sol non carbonaté
- pH légèrement acide
- teneur satisfaisante en matière organique
- teneur faible en phosphore
- capacité d'échange faible
- complexe adsorbant bien pourvu en Ca⁺⁺, K⁺ et Mg⁺⁺

PROFIL 3b : BRUNISOL MESOSATURE Sableux

Roche-mère : grès du Buntsandstein (Trias inférieur)

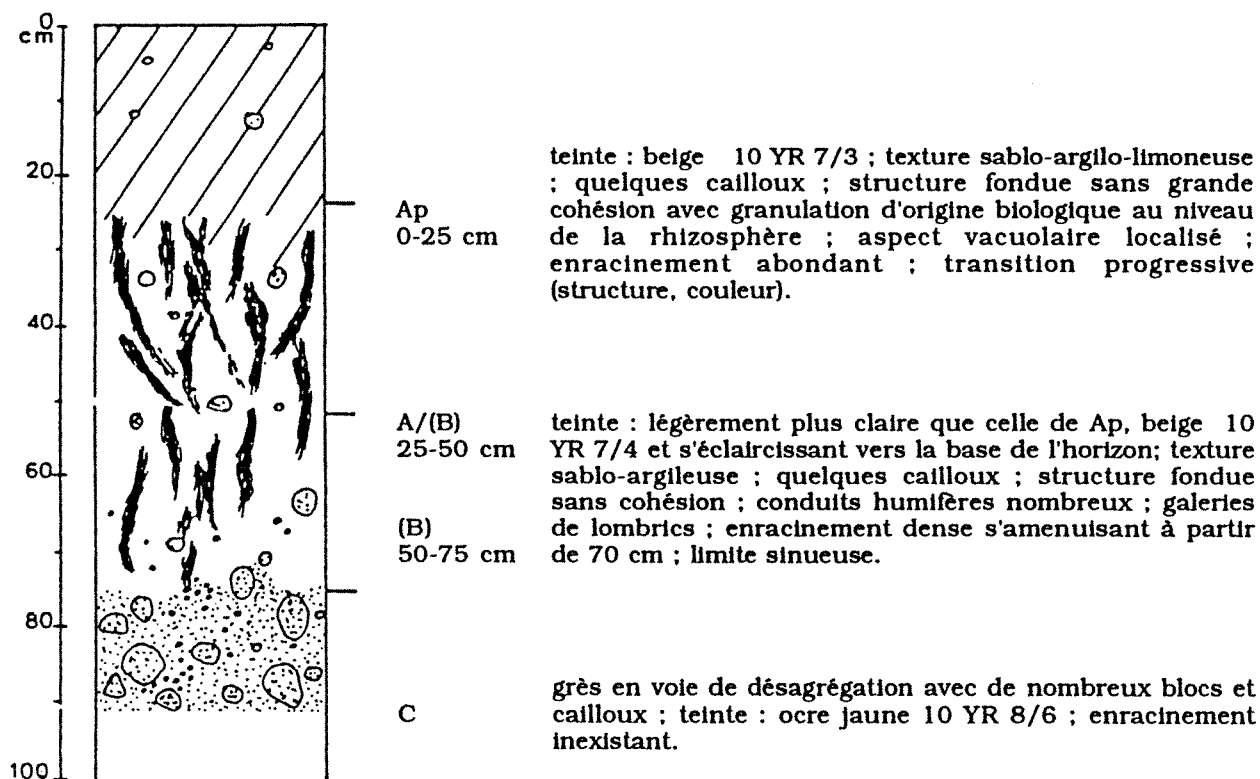
Topographie : pente faible

Occupation du sol : blé

Localisation : Uzemain (Naymont : "Harboissoux")

coordonnées Lambert I : x = 898,70 y = 1053,59

z = 390 m



Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					C %	MO %	N %	C/N	pH eau	P ₂ O ₅ % DYER	Bases échangeables meq/100			CEC meq/100g	S/T
		A	LF	LG	SF	SG							Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺		
Ap	0-25	14,3	17,4	9,0	28,9	30,4	1,19	2,05	0,105	11,33	5,8	0,23	3,4	0,46	0,541	6,1	72,1
(B)	25-80	19,1	15,3	7,9	29,4	28,3	0,51	0,88			5,8	0,01	2,9	0,37	0,420	5,0	73,8
C	80-110	8,9	3,9	2,0	30,8	54,4					4,8		1,0	0,12	0,087	3,5	34,5

Prof cm	Al "libre" %	Al total %	Fe "libre" %	Fe total %	Mn "libre" %	Mn éch. %	Mn total %	d ap	C.C. %	P.F. %
0-25	0,18	4,02	0,56	0,89	0,46	0,0129	0,462	1,56	18	8
25-80	0,21	4,87	0,60	1,02	0,25		0,283	1,68	14	10
80-110	0,14	4,87	0,44	0,76	<0,05		0,040	1,70	8	6

pour le 1^{er} horizon :

- pH acide
- teneur insuffisante en matière organique
- teneur un peu faible en phosphore
- très faible capacité d'échange
- teneur élevée en potassium
- teneurs faibles en calcium mais satisfaisante en magnésium
- teneur élevée en aluminium total

PROFIL 4b : BRUNISOL MESOSATURE argileux

Roche-mère : argiles carbonatées du Buntsandstein (Trias inférieur)

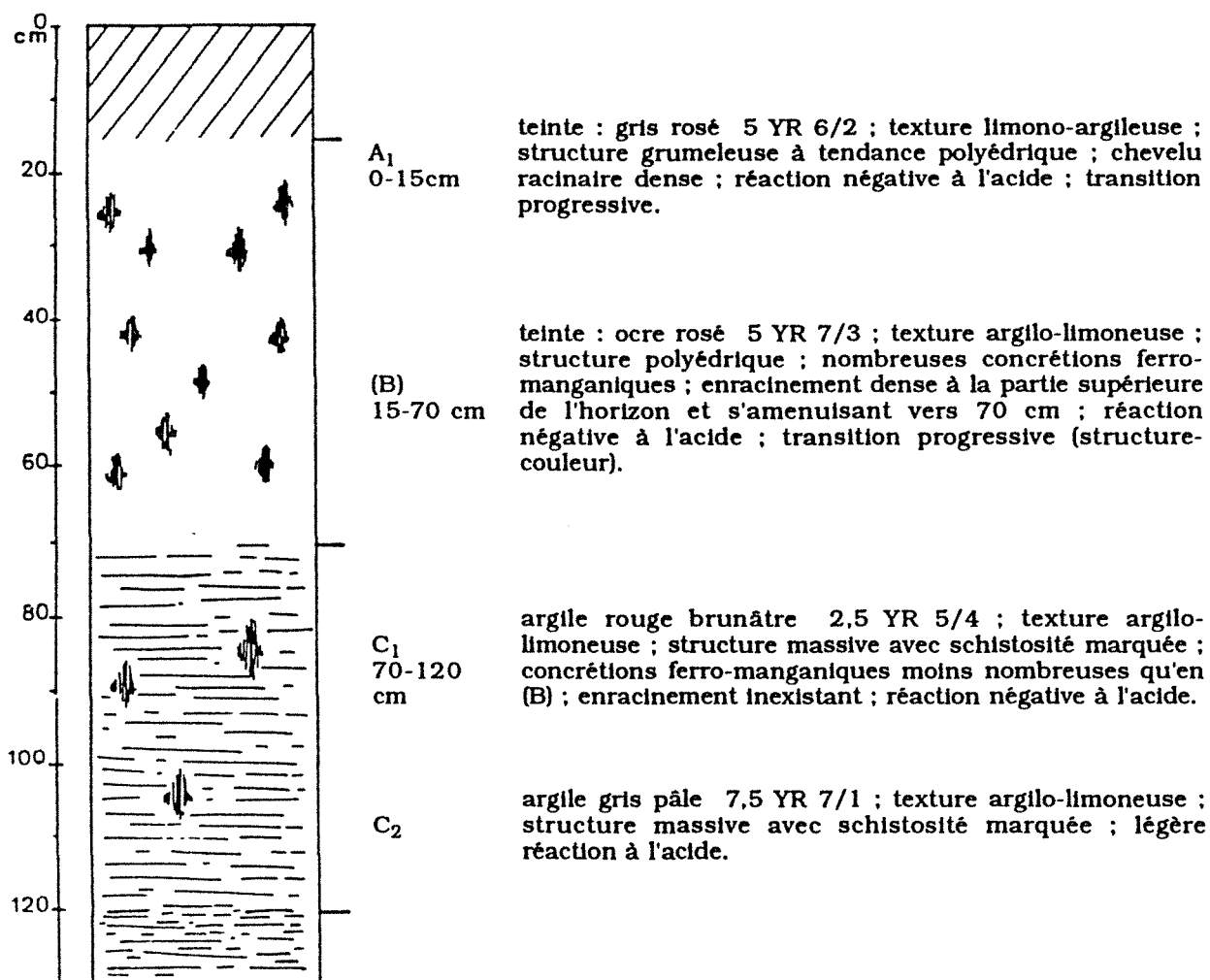
Topographie : plane

Occupation du sol : prairie

Localisation : Uzemain (Naymont)

coordonnées Lambert I : x = 898,55 y = 1053,10

z = 375 m



Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					C %	MO %	N %	C/N	pH eau	P ₂ O ₅ % DYER	Bases échangeables meq/100			CEC meq/100g	S/T
		A	LF	LG	SF	SG							Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺		
A ₁	0-10	20,1	41,7	10,5	9,3	6,4	3,10	5,44	0,321	9,84	5,9	0,80	9,8	0,86	0,839	13,2	85,6
(B)	10-40	28,5	40,3	15,7	8,1	7,4	1,32	2,27	0,147	8,98	6,0	0,06	6,2	0,68	0,304	9,7	74,1
B/C	40-120	37,3	43,9	8,1	4,9	5,8					7,3		16,2	2,35	0,293	10,3	sat.
C	120-140	31,9	50,2	6,7	5,0	6,2					8,3		17,4	2,73	0,318	9,1	sat.

Prof cm	Fe "libre" %	Fe total %	Mn éch. ‰	Mn total %	C.C. %	P.F. %
0-10			0,0223		36	24
10-40					28	17
40-120					29	18
120-140	0,57	3,94		0,7540	26	15

pour le 1^{er} horizon :

- pH acide pour les 2 premiers horizons, basique ensuite
- teneur élevée en matière organique
- très forte teneur en phosphore
- capacité d'échange correcte
- teneur élevée en potassium
- bonnes teneurs en calcium et en magnésium

PROFIL 7b : BRUNISOL MESOSATURE limoneux

Roche-mère : argiles du Buntsandstein (Trias inférieur)

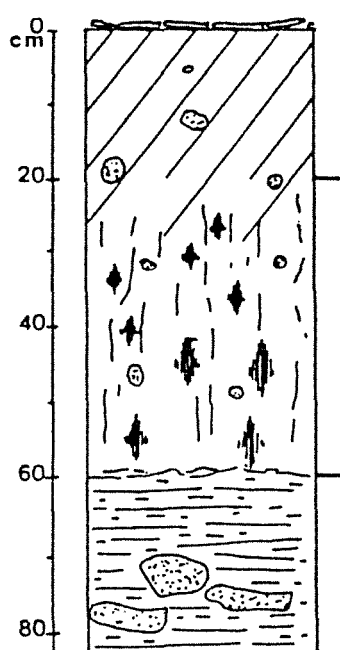
Topographie : presque plane

Occupation du sol : blé

Localisation : Uzemain ("Les Malnavets")

coordonnées Lambert I : x = 899,62 y = 1049,97

z = 380 m



Ap
0-20 cm

petite croûte de battance ; surface crevassée.

teinte : brun pâle 7,5 YR 6/4 ; texture limono-sablo-argileuse ; quelques cailloux ; structure fondue sans grande cohésion avec une granulation d'origine biologique importante ; paille de colza non encore décomposée ; enracinement dense.

(B)
20-60 cm

teinte : ocre brunâtre 5 YR 6/4 ; texture limono-argilo-sableuse ; quelques cailloux ; structure fondue avec ébauche d'une structure prismatique et en colonnes (légères fentes de retrait) ; plages ocre disposées selon les lignes de circulation préférentielle de l'eau et dont la couleur s'intensifie avec la profondeur ; galeries de lombrics ; enracinement dense à l'intérieur de tout l'horizon ; limite sinueuse.

C

argile de diverses teintes dont les principales sont le rouge brun, 2,5 YR 5/4 et l'ocre brunâtre 5 YR 6/4 ; texture limono-argilo-sableuse ; quelques blocs de grès violacé ; taches noires abondantes ; réaction négative à l'acide ; enracinement absent.

Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					C %	MO %	N %	C/N	pH eau	P ₂ O ₅ % DYER	Bases échangeables meq/100			CEC meq/100g	S/T
		A	LF	LG	SF	SG							Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺		
Ap	0-20	22,3	23,9	15,3	31,4	7,1	1,98	3,41	0,188	10,53	5,6	0,12	6,1	0,45	0,180	10,1	66,6
(B)	20-60	25,5	24,8	14,3	28,9	6,5	0,79	1,36			5,7	0,01	5,2	0,30	0,159	8,2	69
C	60-120	23,7	21,2	14,0	33,6	7,5					4,7		1,0	0,21	0,246	7,8	14,6

Prof cm	Fe %	Fe total %	Mn éch. ‰	Mn total ‰	d ap	C.C. %	P.F. %
0-20	1,15	1,90	0,0233	1,176	1,43	23	14
20-60					1,72	23	12
60-120	1,82	3,33		1,056	1,79	21	11

pour le 1^{er} horizon :

- pH acide
- teneur élevée en matière organique
- faible teneur en phosphore
- capacité d'échange un peu faible
- teneur faible en potassium
- teneur un peu faible pour le calcium
- teneur satisfaisante en magnésium

PROFIL 2 : ALOCRISOL TYPIQUE moyennement profond

Roche-mère : migmatite de Gerbépal

Topographie : légère pente (inférieure à 5%)

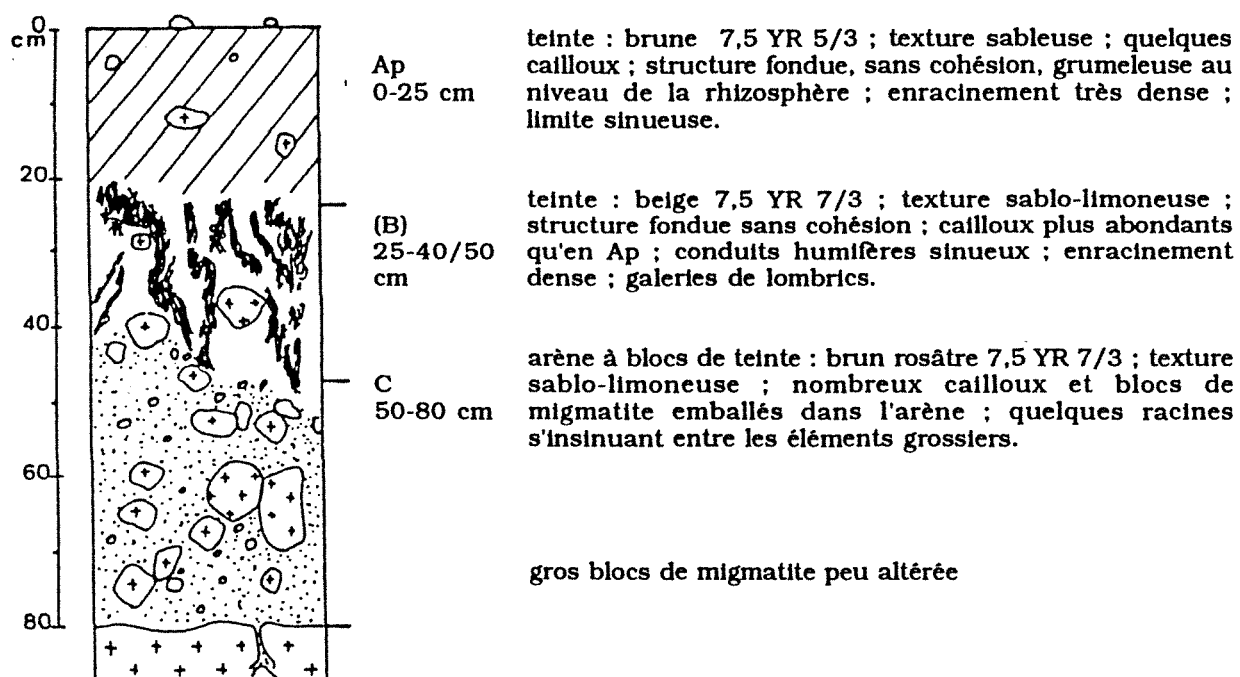
Occupation du sol : orge de printemps

Localisation : Arrentès-de-Corcieux ("La Querelle")

coordonnées Lambert I : x = 936,69

y = 1059,88

z = 690 m



Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					C %	MO %	N %	C/N	pH eau	P ₂ O ₅ % DYER	Bases échangeables meq/100			CEC meq/100g	S/T
		A	LF	LG	SF	SG							Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺		
Ap	0-25	8,9	16,7	6,9	13,9	53,6	2,82	4,85	0,277	10,18	5,9	0,79	4,7	0,43	1,231	10,2	58,7
(B)	25-60	1,7	20,4	10,1	15,1	52,7	0,94	1,62			5,3	0,10	<0,5	0,05	0,514	6,0	< 17,7
C	60-80	4,8	15,5	9,1	19,1	51,5					5,1		<0,5	0,02	0,197	4,1	< 17,5

Prof cm	Al "libre" %	Al total %	Fe "libre" %	Fe total %	Mn éch. ‰	Mn "libre" ‰	Mn total ‰	C.C %	P.F. ‰
0-25	0,52	6,68	0,85	1,62	0,0035	0,56	0,637	20	14
25-60	0,56	7,92	0,73	1,90		0,19	0,354	14	6
60-80								12	5

pour le 1^{er} horizon :

- pH acide
- teneur élevée en matière organique
- très forte teneur en phosphore
- capacité d'échange un peu faible
- teneur très élevée en potassium
- teneur faible en calcium mais satisfaisante en magnésium

PROFIL 3c : ALOCRISOL TYPIQUE profond

Roche-mère : migmatite de Gerbépal

Topographie : plane

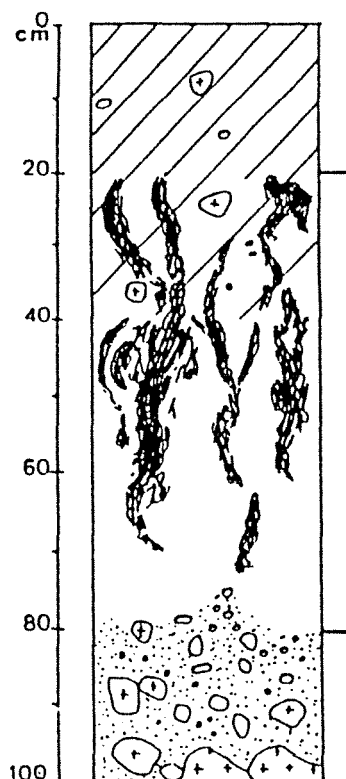
Occupation du sol : prairie

Localisation : Corcieux ("Harifaing")

coordonnées Lambert I : x = 935,88

y = 1062,12

z = 580 m

A₁
0-20 cm

teinte : brune 7,5 YR 5/3 ; texture sablo-limoneuse ; cailloux rares ; structure fondue, sans cohésion, particulière par endroits et grumeleuse au niveau de la rhizosphère ; enracinement très abondant ; transition progressive avec (B) : décoloration.

(B)
20-80 cm

teinte : brun rosâtre 7,5 YR 7/3 ; texture sablo-argillo-limoneuse ; cailloux rares ; structure fondue sans cohésion ; quelques conduits plus humifères sinueux ; galeries de lombrics ; enracinement abondant se faisant plus rare vers 80 cm.

C

arène à blocs de couleur juxtaposées :

rouge brunâtre 2,5 YR 4/4

rouge 2,5 YR 5/6

et rouge violacé clair 10 R 4/4

texture sableuse ; nombreux graviers et cailloux emballés dans du sable ; enracinement inexistant.

Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					C %	MO %	N %	C/N	pH eau	P ₂ O ₅ % DYER	Bases échangeables meq/100			CEC meq/100g	S/T
		A	LF	LG	SP	SG							Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺		
A ₁	0-20	16,3	17,6	6,8	9,0	50,3	2,66	4,58	0,252	10,56	6,1	0,61	5,8	0,46	0,841	10,7	66,4
(B)	20-80	14,5	20,1	6,9	10,6	47,9	1,27	2,18	0,129	9,84	5,3	0,13	1,3	0,11	0,344	7,3	24,0
C	80-120	8,4	10,7	5,9	16,4	58,6					4,8		<0,5	0,03	0,166	3,8	<18

Prof cm	dap	C.C. %	P.F. %
0-20	1,34	20	13
20-80	1,37	19	11
80-120	1,73	11	4

pour le 1^{er} horizon : - pH modérément acide en surface

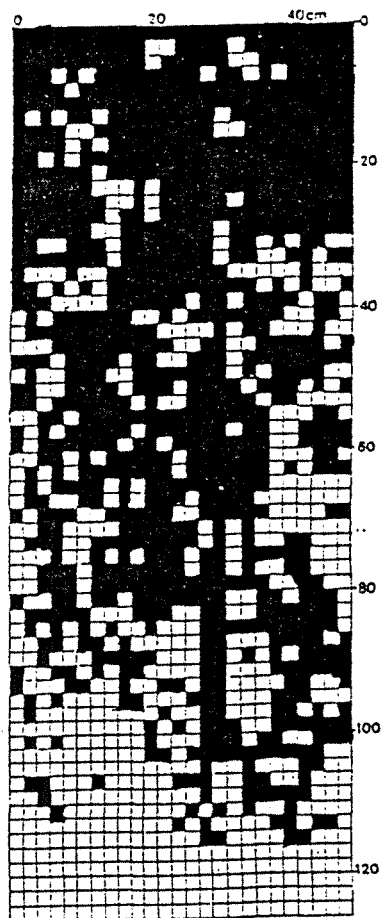
- teneur élevée en matière organique

- teneur élevée en phosphore

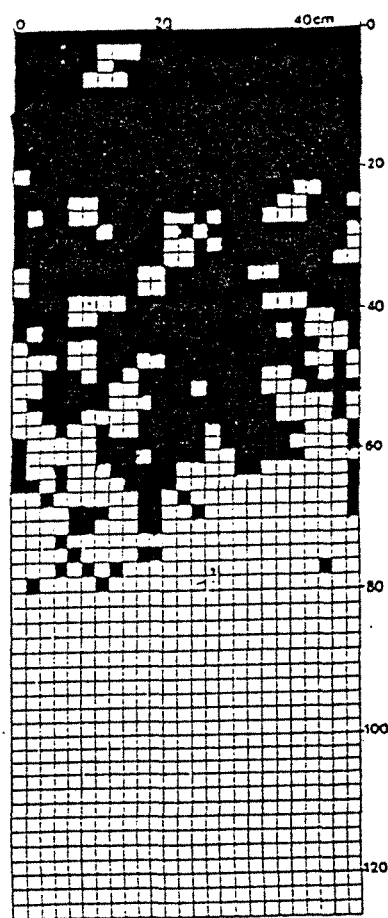
- capacité d'échange un peu faible

- teneur élevée en potassium

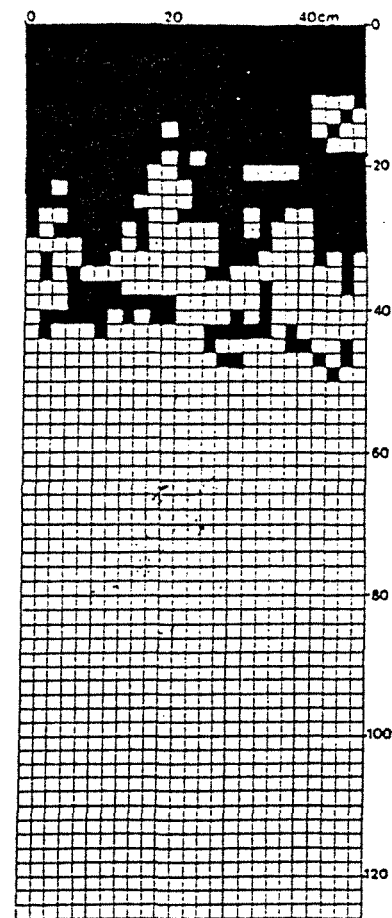
- teneurs un peu faibles en calcium mais satisfaisante en magnésium



NEOLUVISOL(orge)

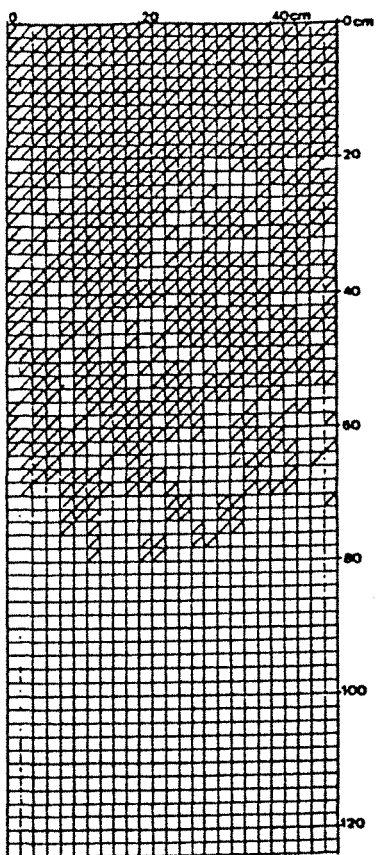


CALCISOL(blé)

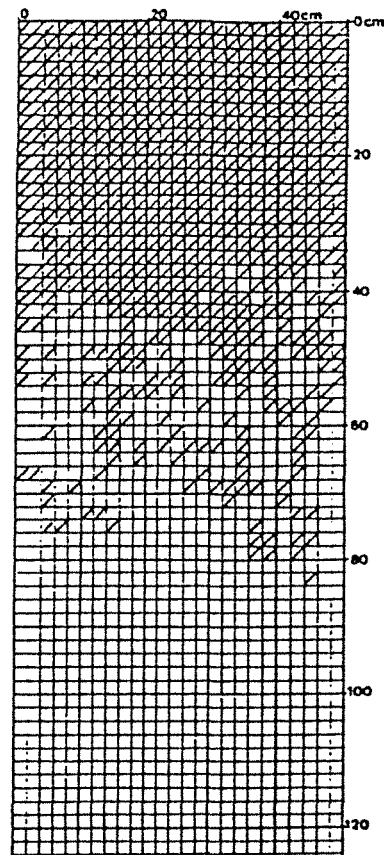


CALCOSOL(orge)

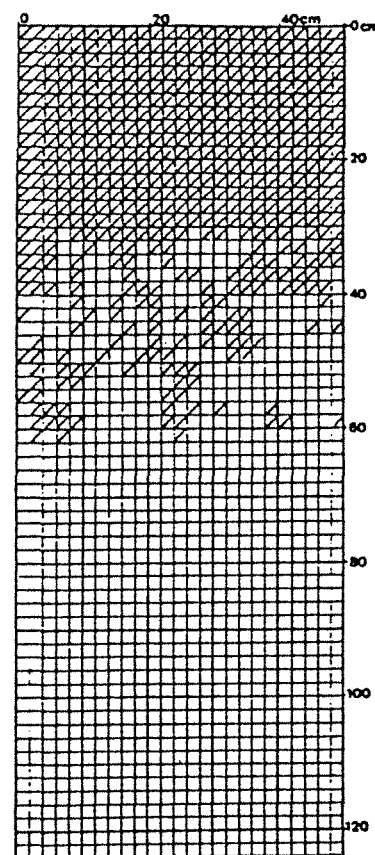
ANNEXE I-11 : PROFILS RACINAIRES DES SOLS DU BARROIS



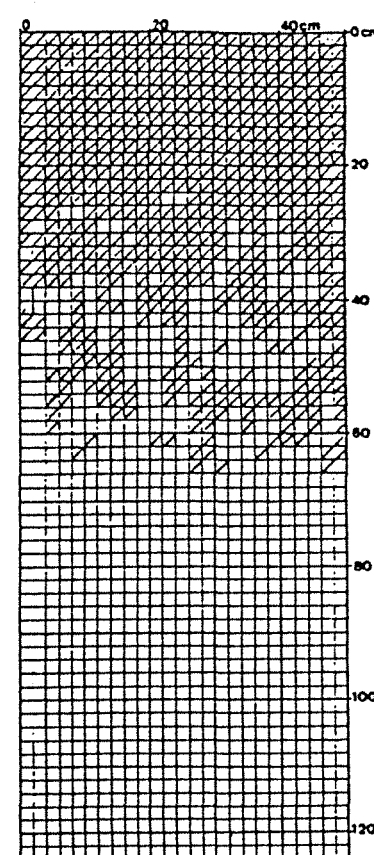
BRUNISOL MESOSATURE
sableux(orge)



BRUNISOL MESOSATURE
argileux(pairie)



BRUNISOL MESOSATURE
argilo-limoneux(blé)



ALOCRI SOL TYPIQUE
profond(orge)

ANNEXE I-12 : PROFILS RACINAIRES DES SOLS DES VOSGES

Annexe I-13 : Paramètres et facteurs pour la classification des sols (selon la méthode américaine de 8 classes I.M.T.A., 1988)

Sous-classes de terres	Facteurs de classification	CLASSES D'APTITUDE DES SOLS							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
EROSION E	RISQUES D'EROSION E ₁	légère	modérée	modérément élevée	élevée	légère	très élevée	très élevée	Aires non capables de produire plantes commerciales exemples : affleurement rocheux, plages etc.
	EROSION ACTUELLE E ₂	légère	modérée	modérément sévère	sévere	légère	très sévère	très sévère	
DRAINAGE D	RUISSELLEMENT D ₁	moyen	lent-moyen	lent ou rapide	gorgé ou rapide	sans limites	sans limites	sans limites	
	INONDATION D ₂ - FREQUENCE /AN	aucune	< 3 fois ; seulement en saison de pluie < 24h	< 3 fois ; seulement en saison de pluie < 24h	seulement en saison de pluie	sans limite	sans limite	sans limite	
	- TEMPS				sans limite	< 6 mois	< 7 mois	sans limite	
	NAPPE PHREATIQUE D ₃								
	- SAISON HUMIDE - Prof (cm) - Temps (mois) - SAISON SECHE (prof cm)	> 150 < 3	> 150 < 3	> 100 < 3	> 0 < 6	sans limite < 8	sans limite < 7	sans limite sans limite	
PERMEABILITE D ₄	> 150	< 150	> 150	> 100	> 50	> 50	> 0		
TOPOGRAPHIE T	PENTE (%) T ₁	< 2	< 4	< 7	< 15	< 2	< 30	sans limite	
	RELIEF T ₂	presque plane	légèrement ondulé	modérément ondulé	fortement ondulé	presque plane	très fortement ondulé	escarpé	
SOL S	TEXTURE (1) S ₁ (dans tout le profil)	C, Ca, Cl, Cra, CrI, L, argiles non plastiques	C, Ca, Cl, Cr, Cra, CrI, L, Ra, RI R < 60% non vertisols	toutes exceptées Ac et A	toutes exceptées A	toutes	toutes	toutes	
	PROFONDEUR EXPLOITABLE PAR LES RACINES S ₂ (cm)	> 100	> 100	> 75	> 50	> 100	> 25	sans limite	

Suite Annexe I-13

SOL	S	SALINITE S ₃ (mmhos/cm) 0-20	< 4	< 4	< 4	< 4	< 8	< 8	sans limite
		20-40	< 4	< 4	< 4	< 8	< 8	< 16	sans limite
		40-100	< 4	< 4	< 8	< 16	< 16	< 16	sans limite
		SODICITE S ₄ (P.S.E.) 0-20 cm	< 4	< 4	< 4	< 15	< 15	< 20	sans limite
		20-75 cm	< 4	< 15	< 20	< 60	< 20	< 100	sans limite
		PIERROSITE DANS LE PROFIL (%) S ₅	< 15	< 35	< 60	< 60	< 80	< 85	< 90
		PIERROSITE SUPERFICIELLE (%) S ₆	< 15	< 20	< 35	< 35	< 60	< 60	< 90
		GRAVIERS (2-7,5 cm diamètre)	< 15	< 20	< 35	< 35	< 60	< 60	< 90
CAILLOUX (7,5-25 cm diamètre)	< 5	< 10	< 20	< 35	< 60	< 60	< 90		
PIERRES (> 25 cm diamètre)	0	< 0,1	< 2	< 10	< 25	< 25	< 90		
ROCHOSITE (%) S ₇	0	< 0,1	< 2	< 10	0	< 25	< 85		
FERTILITE POTENTIELLE (2) (C.E.C. meq/100g sol) S ₈	> 24	> 16	sans limite	sans limite	sans limite	sans limite	sans limite		
CLIMAT	C	REGIME HYDRIQUE DU SOL (3) C ₁	udique	ustique		aquique	ustique	aridique	
		REGIME DE TEMPERATURE DU SOL (3) C ₂	(iso)mésique (iso)thermique (iso)hyperthermique	frigide isofrigide				crylique	

(1) Clés des textures (selon la classification USDA)

A, a = sable, sableuse

C, c = équilibrée (franche), loameuse

L, l = limons, limoneuse

R, r = argile, argileuse

(2) Pour la méthode NH₄OAc 1N

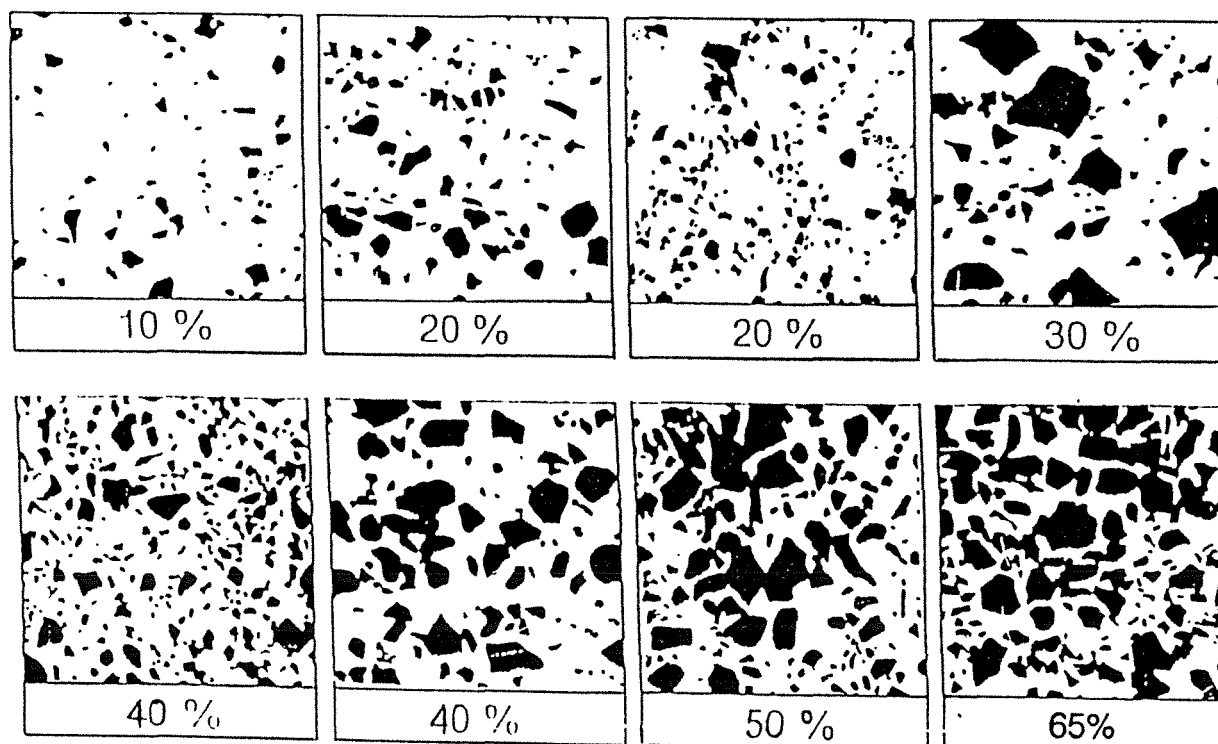
(3) Régimes définis dans la classification américaine "soil taxonomy". (Soil survey staff, 1987).

ANNEXE I-14 : FACTEURS LIMITANTS SYSTEME PARAMETRIQUE

<u>Texture du profil (25 points)</u>	
Limon argileux, limon argilo-sableux	25 points
Limon sablo-argileux, argile, argile limoneuse	20 "
Limon léger, limon moyen, limon moyen sableux, sable argileux ..	15 "
Limon sableux, argile lourde, argile sableuse	10 "
Sable, sable limoneux	5 "
<u>Teneur en carbonates (5 points)</u>	
Forte effervescence à l'acide	5 points
Effervescence modérée	3 "
Réaction nulle	0 "
<u>Profondeur exploitable par les racines (15 points)</u>	
- Au delà de 80 cm	15 points
- Entre 40 et 80 cm	10 "
- Entre 20 et 40 cm - et sols podzoliques	5 "
- Moins de 20 cm - lithosols, régosols	2 "
<u>Charge en éléments grossiers (10 points)</u>	
- Moins de 25% de pierres	10 points
- Plus de 25% de pierres calcaires	5 "
- Plus de 25% de pierres siliceuses	2 "
<u>Réserves utiles en eau (10 points)</u>	
De 0 à 24 mm	0
25 à 49 mm	2 points
50 à 74mm	4 "
75 à 99 mm	6 "
100 à 124 mm	7 "
125 à 149 mm	8 "
150 à 175 mm	9 "
175 à 200 mm	10 "
Plus de 200 mm	10 "
<u>Intensité de la stagnation de l'eau (20 points)</u>	
Terres saines	20 points
Hydromorphie temporaire entre 40 et 80 cm	10 "
Drainage faible à très faible	5 "
Nappe permanente profonde	2 "
Pseudogley de surface	2 "
Nappe permanente peu profonde	0 "
<u>Etat calcique et organique de la couche arable (15 points)</u>	
Très bon	15 points
Bon	12 "
Correct	9 "
Médiocre	6 "
Mauvais	3 "
Très mauvais	0 "

CONDITIONS D'UTILISATION		268																
<p>Méthode tarière si : < 25% de cailloux en surface et profondeur > 30 cm Méthode cailloux : dans les autres cas</p>																		
<p>CASE 1 : La nature du matériau atteint en fond de tarière</p> <p>A = Argile C = Calcaire G = Grés Ga = Galets alluviaux Gr = Grève L = Limon M = Marnes S = Sable D = Divers</p> <p style="text-align: right;">on ajoute :</p> <p>U : si colluvion V : si alluvion (sauf Ga) + : si le matériau est carbonaté</p>	<p>CASE 3 : le développement du profil</p> <p><u>Au numéroteur</u> : la texture de surface</p> <ul style="list-style-type: none"> - classes du triangle de texture, si analyse - appréciation tactile : ALo - A - AI - LA - S <p style="padding-left: 20px;">On ajoute un C si cailloux et un † si le matériau est carbonaté</p> <p><u>Au dénominateur</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - l'apparition d'un matériau différent de celui de surface avec sa profondeur - la profondeur d'apparition d'un horizon compacté (HC) 																	
<p>CASE 2 : La profondeur de prospection possible à la tarière ou le % de cailloux vus en surface</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Prospection à la tarière</th> <th style="text-align: left;">% cailloux en surface</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 - Prof < 20 cm</td> <td>I - < 10%</td> </tr> <tr> <td>2 - 20 < p < 40</td> <td>II - 10 à 25%</td> </tr> <tr> <td>3 - 40 < p < 60</td> <td>III - 25 à 45%</td> </tr> <tr> <td>4 - 60 < p < 80</td> <td>IV - > 45%</td> </tr> <tr> <td>5 - 80 < p < 100</td> <td></td> </tr> <tr> <td>6 - 100 < p < 120</td> <td></td> </tr> <tr> <td>7 - P > 120</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Prospection à la tarière	% cailloux en surface	1 - Prof < 20 cm	I - < 10%	2 - 20 < p < 40	II - 10 à 25%	3 - 40 < p < 60	III - 25 à 45%	4 - 60 < p < 80	IV - > 45%	5 - 80 < p < 100		6 - 100 < p < 120		7 - P > 120		<p>CASE 4 : La sensibilité à l'excès d'eau et les traces d'hydromorphie visibles</p> <p style="text-align: center;"><i>R : vitesse de ressuyage au printemps</i></p> <p>S : sol très sain dans lequel il n'y a jamais de problème d'hydromorphie. R < 2 J</p> <p>D : sol sain et bien drainé. Les problèmes d'excès d'eau restent occasionnels. R : 2 à 3 J</p> <p>M : sol moyennement sain. Travaux de drainage fréquents. R : 4 à 5 J</p> <p>H : sol humide. Excès d'eau fréquent : R très lent > 5 J</p> <p style="padding-left: 20px;">On ajoute à la lettre la profondeur d'apparition des signes d'hydromorphie.</p>	
Prospection à la tarière	% cailloux en surface																	
1 - Prof < 20 cm	I - < 10%																	
2 - 20 < p < 40	II - 10 à 25%																	
3 - 40 < p < 60	III - 25 à 45%																	
4 - 60 < p < 80	IV - > 45%																	
5 - 80 < p < 100																		
6 - 100 < p < 120																		
7 - P > 120																		

GRILLE D'ESTIMATION DE LA PIERROSITE DE SURFACE



REPARTITION GEOGRAPHIQUE
 UNITE DE L'ESQUISSE PEDOLOGIQUE N° 3-32-33
 - Vôge - Montagne Vosgienne
 - Plateau Lorrain - Warndt
TOPOGRAPHIE
 - Plateau
ROCHE MERE
 - Grès

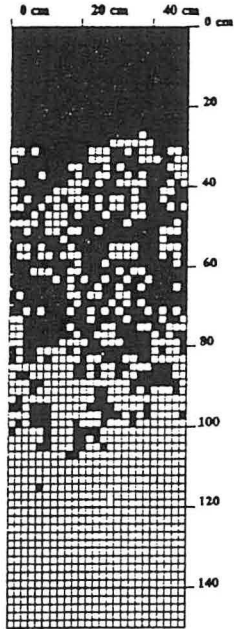
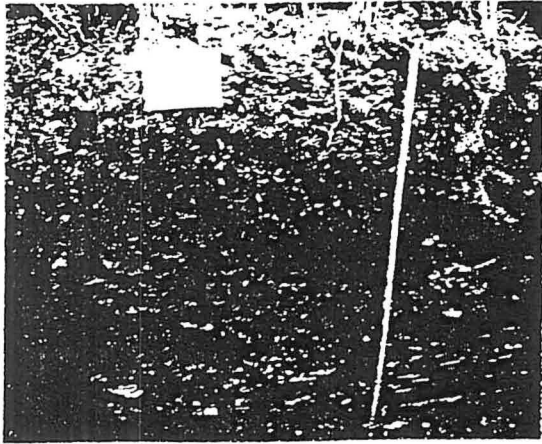
TYPE DE SOL
 - Sols sableux acides sur grès (et sur granite)

CODIFICATION CORRESPONDANTE A PARTIR D'UNE CARACTERISATION SIMPLIFIEE A LA TARIERE

EXEMPLE D'OBSERVATIONS SUR LE PROFIL

- ENRACINEMENT SUR BLE (1990)

- VOID D'ESCLÉS (88)



CODIFICATION LA PLUS FREQUENTE

Nature du matériau en fond de tarière	Profondeur de prospection possible à la tarière ou % de cailloux en surface	Développement du profil	Vitesse de ressuyage et sensibilité à l'excès d'eau
S	7	S	S
G	4 à 7	SL S	

VARIANTES POSSIBLES (critère par critère)

RESULTATS AGRONOMIQUES OBSERVES

POTENTIEL DE RENDEMENT

RENDEMENT MINIMUM ATTEINT / ESPECE	MAIS FOURRAGE (T MS/HA)
9 années sur 10	14
4 années sur 5	16,5
1 année sur 2	16,5
1 année sur 5	16,5

CARACTERISTIQUES AGRONOMIQUES

- Sols homogènes sableux, acides
- PROFONDEURS D'ENRACINEMENT OBSERVEES (en cm) : 90 à 110
- RESERVE UTILE EN MM D'EAU : 80 à 100
- Eléments grossiers présents dans le profil (cailloux, blocs gréseux ou granitiques)

FOURNITURES EN AZOTE (en kilogrammes par hectare)

- Pour le blé d'hiver : 80 à 140
- Pour le maïs fourrage : 155 à 165

SELON LE SYSTEME DE CULTURE

Annexes I-17 : données climatologiques décadaires en mm d'eau
pendant la période de croissance du maïs pour les secteurs du Barrois
et des Vosges*

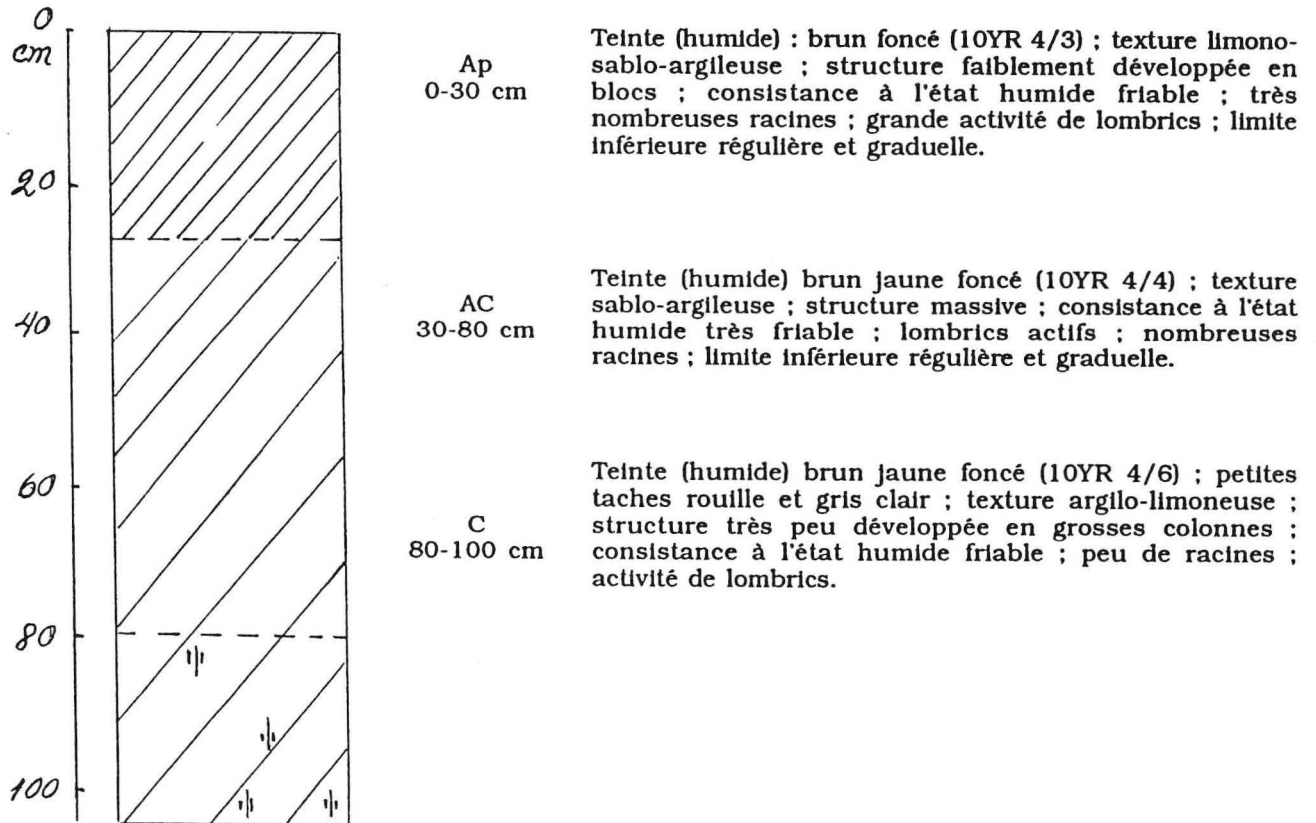
Mois	Décades	Poste Chaumont/Aire 91			Poste Golbey 92		
		P	ETP	P-ETP	P	ETP	P-ETP
avril	D1	7,4	21,4	-14,0	14,7	24,5	-9,8
	D2	10,7	29,3	-18,6	43,9	23,8	20,1
	D3	35,0	26,1	8,9	21,0	27,0	-6,0
mai	D1	0,3	23,8	-23,5	29,4	28,7	0,7
	D2	3,2	30,9	-27,7	0,7	45,3	-44,6
	D3	0	31,2	-31,2	17,2	39,4	-22,2
juin	D1	39,6	28,1	11,5	50,5	28,5	22,0
	D2	45,0	25,9	19,1	3,7	41,1	-37,4
	D3	24,9	29,6	-4,7	0	41,2	-41,2
juillet	D1	42,8	52,4	-9,6	45,0	28,2	16,8
	D2	27,7	37,5	-9,8	12,1	37,8	-25,7
	D3	37,4	41,1	-3,7	6,5	52,4	-45,9
août	D1	10,5	40,2	-29,7	24,8	52,5	-27,7
	D2	0	40,5	-40,5	17,7	33,4	-15,7
	D3	2,6	45,2	-42,6	55,3	33,5	21,8
sep- tembre	D1	7,9	31,8	-23,9	23,9	25,2	-1,3
	D2	6,1	23,7	-17,6	10,0	19,8	-9,8
	D3	64,3	12,3	52,0	11,2	15,1	-3,9

* Le Poste de Chaumont/Aire correspond au secteur de références du Barrois et celui de Golbey au secteur des Vosges

ANNEXE II-1
SITE 1 - DOMMARTIN Les TOUL
FLUVIOSOL TYPIQUE (sol d'apport alluvial récent)

271

Roche-mère : alluvions récentes de la vallée de la Moselle
Topographie : plaine alluviale
Végétation : maïs fourrage
Localisation : commune de Dommartin Lès Toul



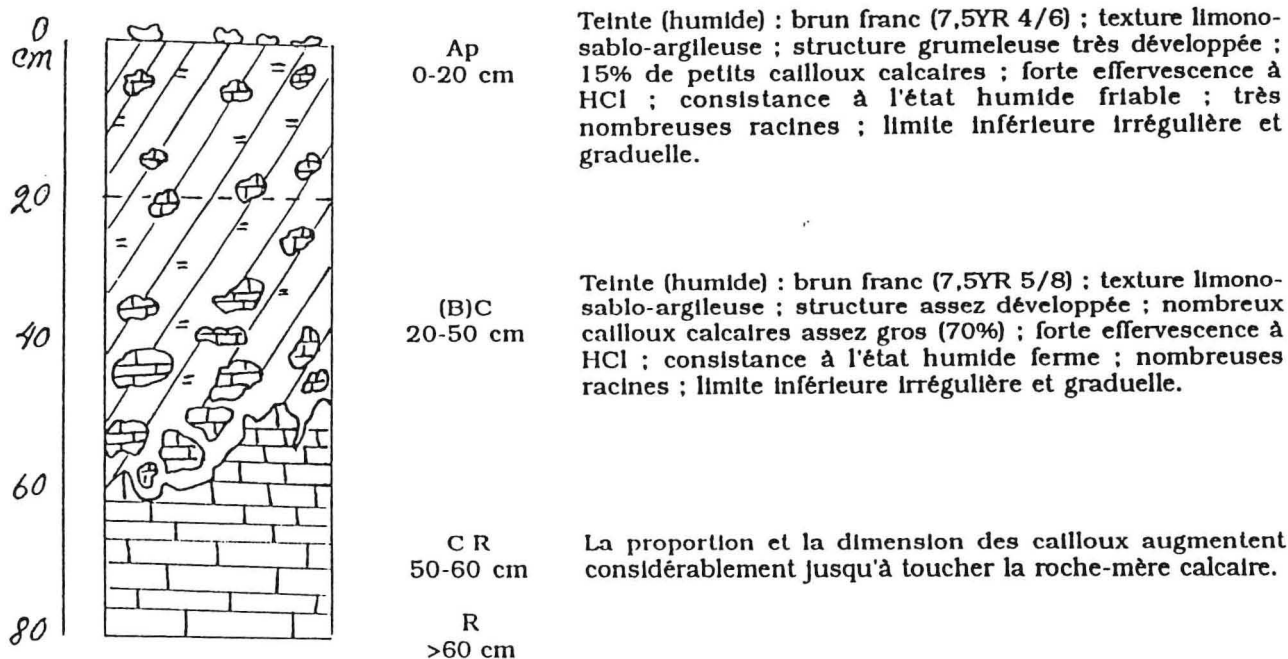
Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					MO %	N Tot. %	C/N	pH eau	P ₂ O ₅ ‰	Bases échangeables meq/100g				CEC meq/100g	S/T
		A	LF	LG	SF	SG						Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺		
Ap	0-30	21,0	15,0	15,2	36,1	12,7	2,29	0,154	8,64	6,8	0,14	12,2	1,59	0,261	0,05	12,8	Sat.
AC	30-80	15,6	11,7	11,5	39,0	22,2	0,95	0,067	8,21	7,2	0,02	9,0	1,15	0,127	-	8,4	Sat.
C	80-100	32,1	26,3	20,0	18,5	3,1	1,00	0,07	8,29	7,6	0,02	16,1	2,61	0,248	-	14,6	Sat.

Hor cm	C.C. %	P.F. %	Dap g/cm ³
Ap	24	14	1,5
AC	17	10	1,5
C	30	19	-

RENDOSOL (Rendzine modale argilo-limoneuse)

Roche-mère : calcaire du Bajocien
Topographie : normal à pente faible
Végétation : maïs fourrage
Localisation : commune de Loisy



Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					MO %	N Tot. %	C/N	pH eau	P ₂ O ₅ % DYER	Bases échangeables meq/100g			CEC meq/100g	S/T
		A	LF	LG	SF	SG						Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺		
Ap	0-20	29,1	17,9	11,8	22,4	18,8	3,9	0,220	8,66	7,9	0,27	36,3	0,44	0,824	14,2	Sat.
(B)C	20-60	24,9	16,9	9,7	21,5	27,0	1,85	0,133	8,12	8,0	0,10	35,6	0,34	0,341	10,0	Sat.

Hor cm	CaCO ₃ %		Cailloux %	C.C. %	P.F. %	Dap gr/cm ³
	Tot.	Act.				
Ap	26,0	4,5	15	27	13	1,2
(B)C	36,6	7,0	70			

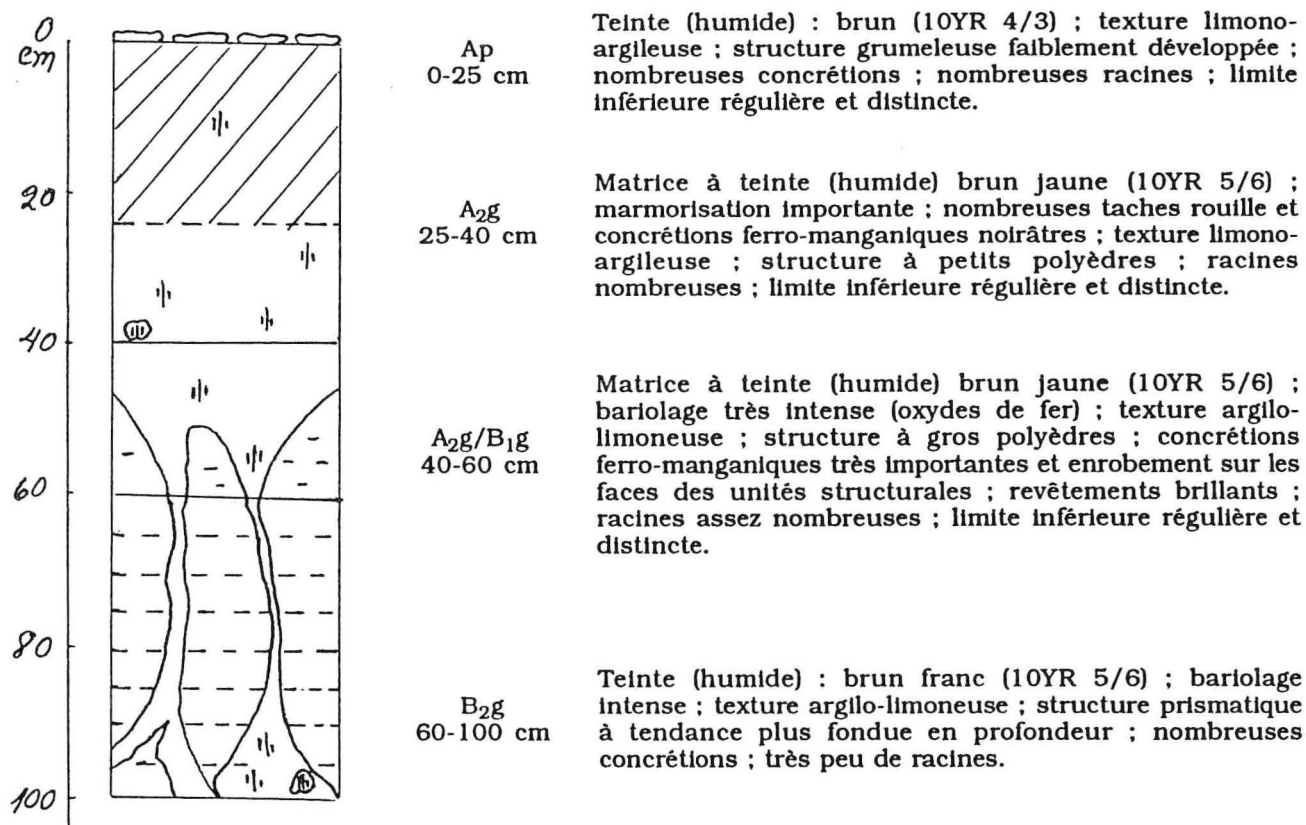
ANNEXE II-3
SITE 5 - LIMON DE LA BOUZULE
NEOLUVISOL (sol brun lessivé à pseudogley)

Roche-mère : limons des plateaux sur lias

Topographie : pente faible

Végétation : maïs

Localisation : commune de Laneuvelotte (Domaine de la Bouzule)



Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					C %	N Tot. %	C/N	pH eau	Bases échangeables meq/100g			CEC meq/100g	S/T	C/C %	P.F. %	Dap gr/cm ³
		A	LF	LG	SF	SG					Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺					
Ap	0-25	26,0	35,2	16,8	5,7	16,2	1,50	0,182	8,2	6,6	10,5	1,75	0,73	13,7	94,7	30	17	1,47
A _{2g}	25-40	31,2	33,4	18,7	4,9	11,8	0,95			6,5	9,5	1,68	0,73	12,8	93,0			1,46
A _{2g} /B _{1g}	40-60	37,2	37,4	11,4	4,4	9,6				6,6	5,5	1,2	0,38	16,7	42,4			1,61
B _{2g}	60-80	40,2	34,5	14,5	3,6	7,2				6,3	14,5	2,9	0,58	17,7	Sat.			1,59
B _{2g}	80-100	39,8	35,4	17,2	3,1	4,5				6,4	15,5	3,15	0,63	18,3	Sat.			1,58

ANNEXE II-4
SITE 6 - ARGILE DE LA BOUZULE
PELOSOL BRUNIFIE (sol brun modal très argileux)

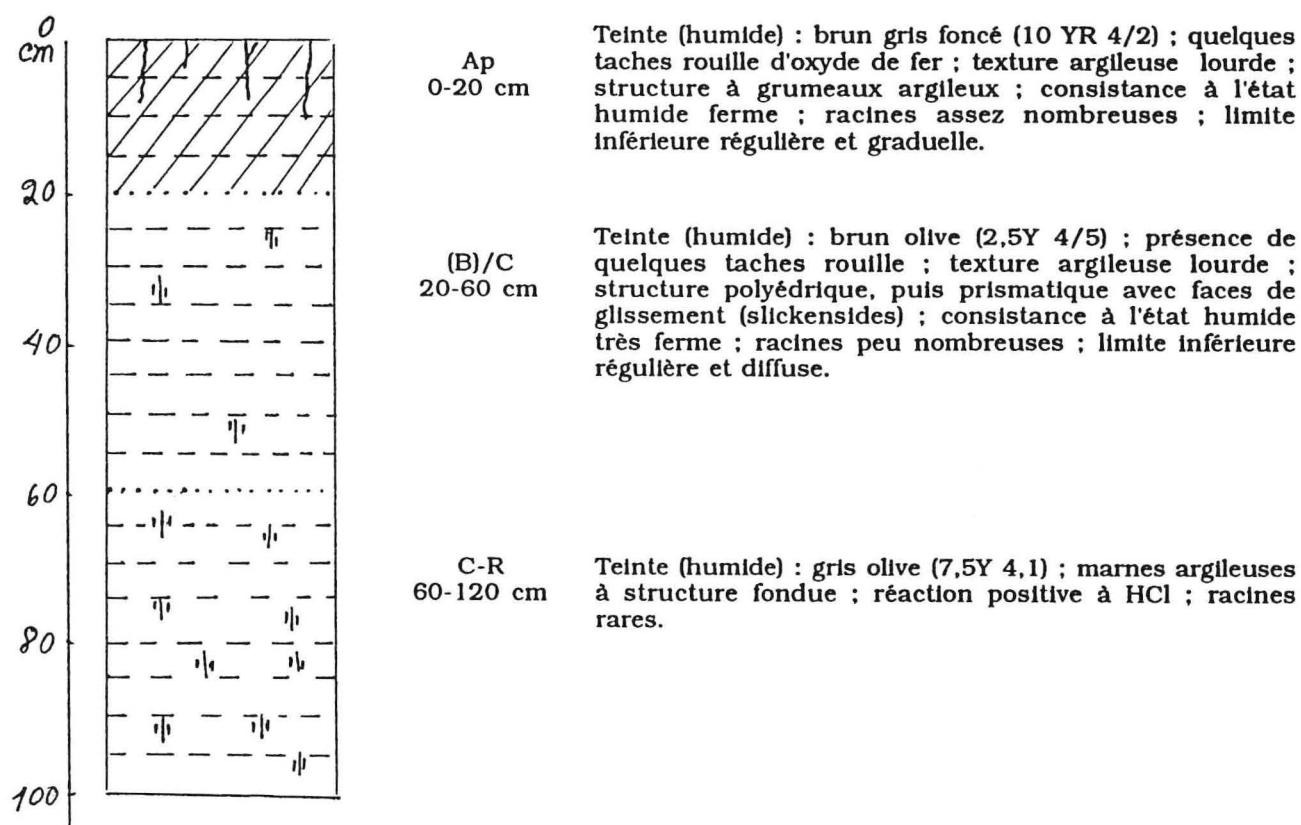
274

Roche-mère : marne argileuse à Hippopodium (Lias inférieur)

Topographie : pente 5 - 8%

Végétation : maïs

Localisation : Commune de Laneuvelotte (Domaine de la Bouzule)

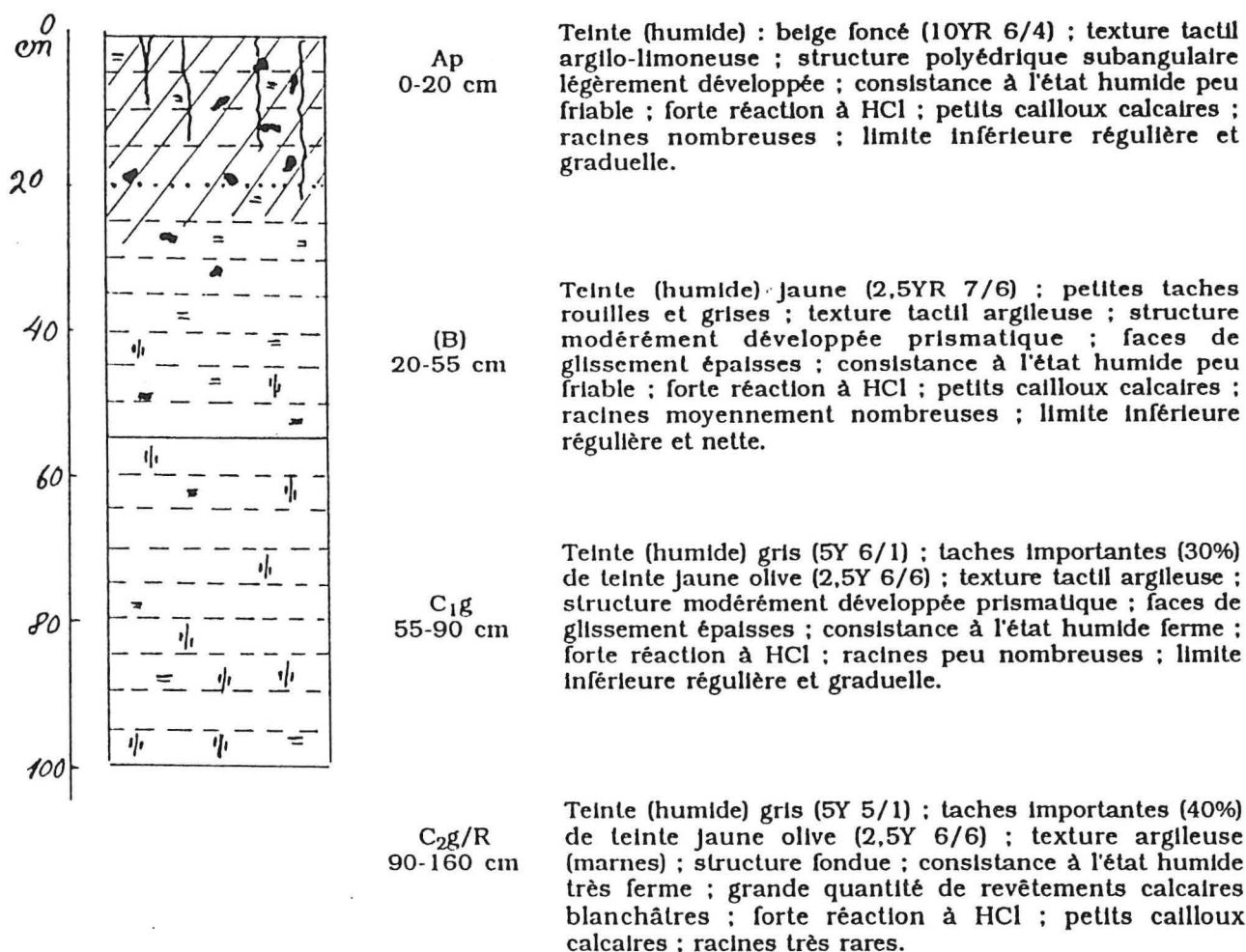


Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					C %	N Tot. %	C/N	pH eau	Bases échangeables meq/100g			CEC meq/100g	S/T	C/C %	P.F. %	Dap gr/cm ³
		A	LF	LG	SF	SG					Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺					
Ap	0-20	54,2	30,5	10,0	3,2	2,1	2,5	0,255	9,8	7,0	Sat.	1,8	0,78	18,4	Sat.	34	21	1,32
(B)/C	20-60	54,1	31,6	11,2	2,1	1,0	0,35	0,098	-	7,9	Sat.	2,7	0,53	18,7	Sat.			1,46
C-R	60-100	53,0	35,0	8,0	2,0	2,0	0,25	0,08	-	8,0	Sat.	4,8	0,48	21,7				1,57

CALCOSOL vertique (sol brun calcaire vertique sur marnes)

Roche-mère : marnes argileuses
Topographie : pente régulière et très légère
Végétation : maïs
Localisation : commune de Lagney (essais N¹⁵)

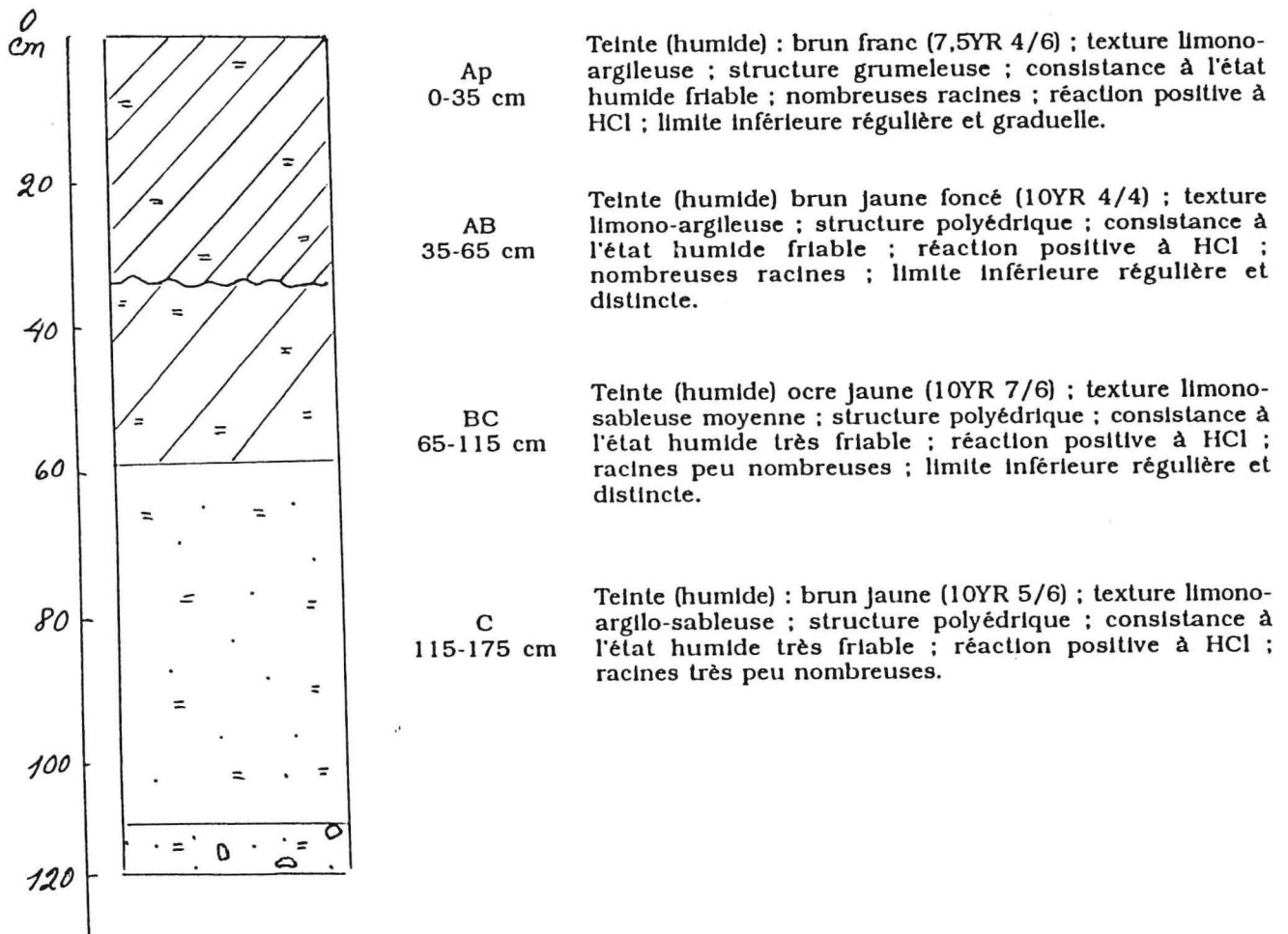


Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					MO %	CaCO ₃ Tot. %	pH eau	P ₂ O ₅ ‰ Joret	Bases échangeables meq/100g				CEC meq/100g	S/T
		A	LP	LG	SF	SG					Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺		
Ap	0-20	41,0	29,8	17,0	5,3	3,5	3,59	5,2	8,0	0,166	49,1	1,74	1,03	0,09	20,6	Sat.
(B)	20-55	42,7	29,3	17,0	5,4	4,3	1,41	5,3	8,0	0,013	48,8	1,41	0,58	0,11	18,2	Sat.
C _{1g}	55-90	44,0	35,2	14,4	3,3	2,2	0,84	15,9	8,2	0,005	47,9	1,73	0,44	0,10	14,4	Sat.

CALCOSOL Pachique (sol brun calcaire limoneux sur Loess)

Roche-mère : loess
Topographie : pente douce
Végétation : maïs
Localisation : commune d'Obernai (lycée agricole)



Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %					MO %	CaCO ₃ total %	C/N	pH eau	Bases échangeables meq/100g				CEC meq/100g	S/T	C/C %	P.F. %	Dap gr/cm ³
		A	LF	LG	SF	SG					Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺					
Ap	0-35	29,4	31,5	30,3	3,3	3,3	2,2	2,4	8,4	8,2	36,1	1,54	0,99	0,13	16,2	Sat.	27	17	1,4
AB	35-65	29,8	32,0	31,8	3,7	1,9	0,8	5,4	7,7	8,3	45,4	1,38	0,34	-	12,8	Sat.	-	-	-
BC	65-115	16,2	33,0	32,3	9,6	8,3	0,4	34,0	8,6	8,6	41,1	1,09	0,15	-	6,6	Sat.	-	-	-
C	115-175	19,4	29,5	30,8	11,8	8,1	0,3	24,3	8,1	8,5	43,5	1,69	0,25	-	9,4	Sat.	-	-	-

SITE 10 - SERIE "LIMON" (MEXIQUE)
VERTISOL (vertisol à drainage externe réduit hydromorphe)

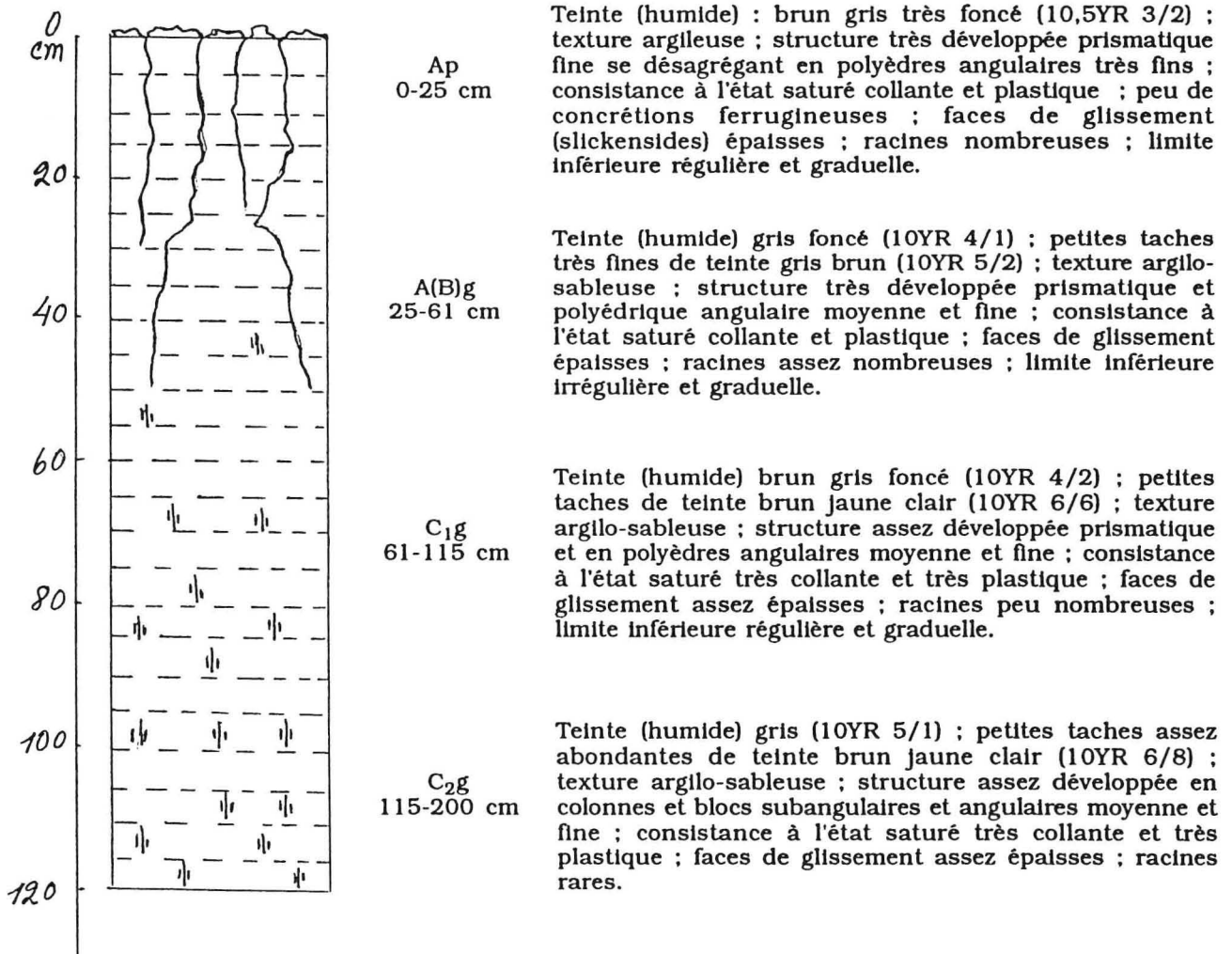
Roche-mère : alluvions récentes de la rivière "Mezcalapa"

Topographie : grande plaine alluviale côtière (pentes normales inférieures à 1%)

Végétation : la végétation naturelle était la forêt tropicale humide, actuellement sous maïs

Localisation : ferme expérimentale du CEICADES commune de Cárdenas dans l'état de Tabasco (région tropicale humide du Mexique)

Fentes de retraita en saison sèche de plus de 1 cm de large et 0,9 m de profondeur



Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %			MO %	N tot. %	C/N	pH		P ₂ O ₅ % DYER	Bases échangeables meq/100g				CEC meq/100g	S/T	C/C %	P.F. %	Dap gr/cm ³
		A	L	S				eau	KCl		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺					
Ap	0-25	31	44	25	1,82	0,107	9,91	6,5	5,9	0,19	20,5	5,43	0,363	0,123	27,8	95	40	11	1,26
A(B)g	25-61	31	20	49	0,93	-	-	6,7	6,2	-	22,8	7,16	0,25	0,123	34,9	87	37	12	1,36
C _{1g}	61-115	32	19	49	1,16	-	-	6,7	6,2	-	22,8	8,9	0,25	0,123	34,1	94	43	13	1,38
C _{2g}	115-200	33	20	47	0,99	-	-	7,0	6,4	-	22,8	9,8	0,225	0,123	34,3	96	37	14	1,34

ANNEXE II-9
SITE 11 - SERIE "GAMAS" (MEXIQUE)
FLUVIOSOL TYPIQUE (sol d'apport alluvial)

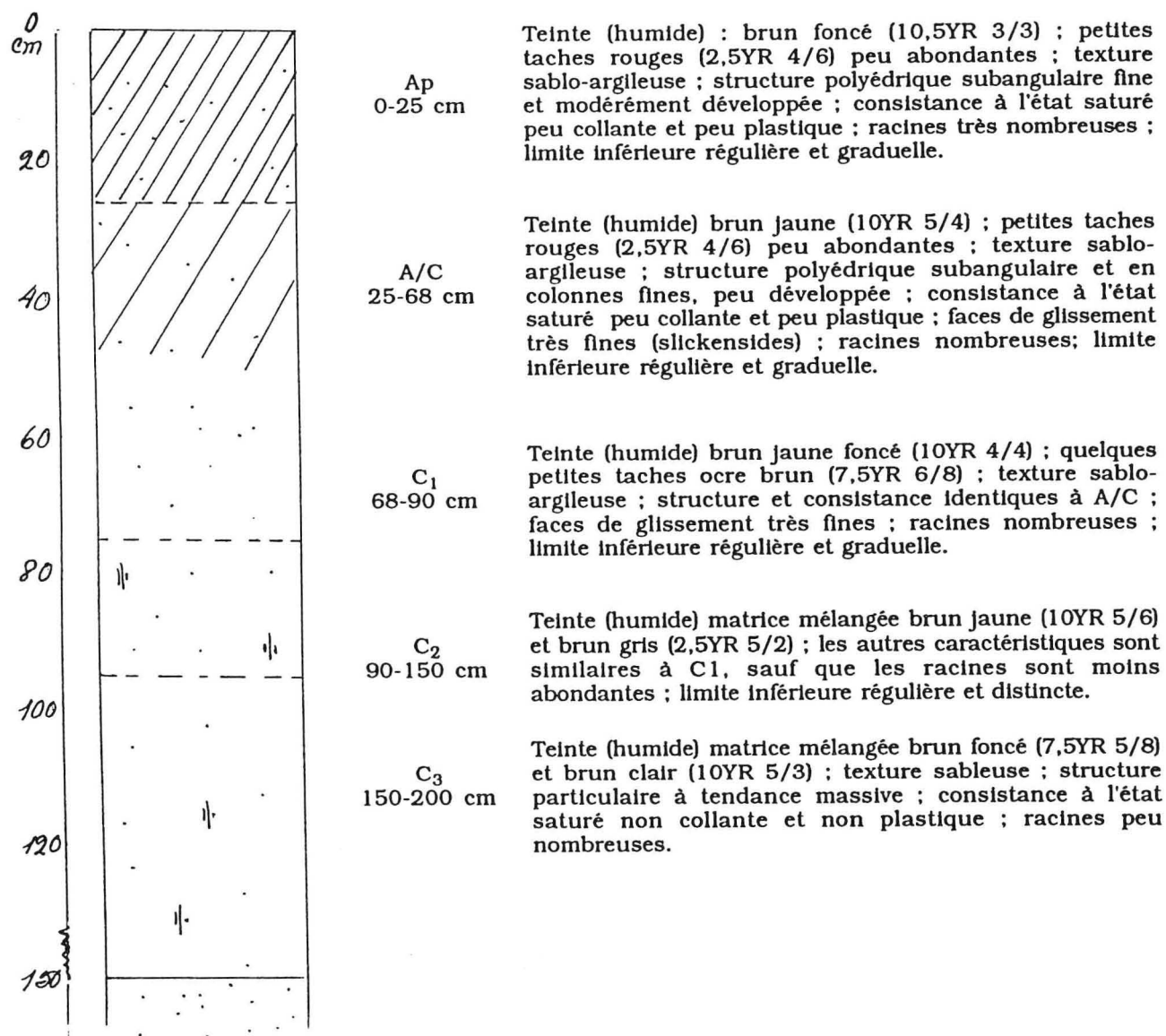
279

Roche-mère : alluvions récentes de la rivière "Mezcalapa"

Topographie : grande plaine alluviale côtière (pentes normales inférieures à 1%)

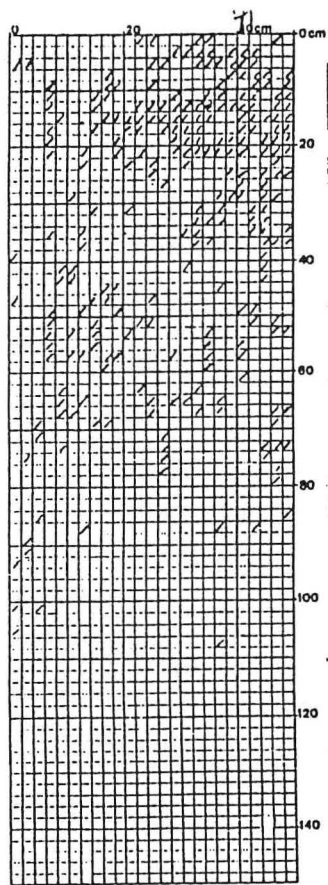
Végétation : la végétation naturelle était la forêt tropicale humide, actuellement sous maïs

Localisation : ferme expérimentale du CEICADES commune de Cárdenas dans l'état de Tabasco (région tropicale humide du Mexique)

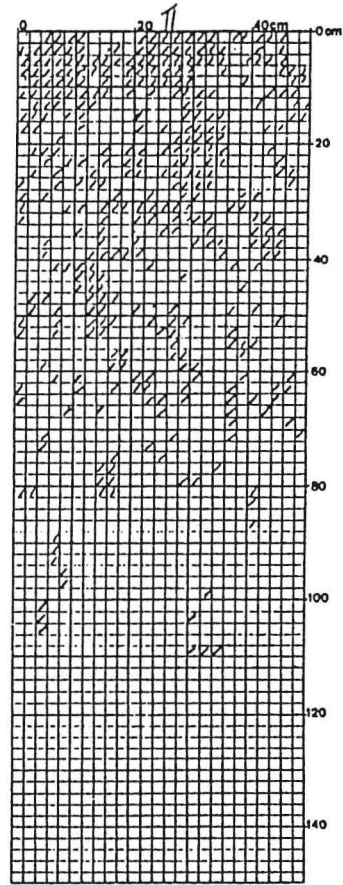


Caractéristiques analytiques du profil

Hor	Prof cm	granulométrie %			MO %	N tot. %	C/N	pH		P ₂ O ₅ % DYER	Bases échangeables meq/100g				CEC meq/100g	S/T	Ac. ech. meq/100g	C/C %	P.F. %	Dap g/cm ³
		A	L	S				eau	KCl		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺						
Ap	0-25	19	13	68	2,58	0,162	9,26	5,6	4,5	0,08	6,5	1,67	0,456	0,159	11,9	73,8	0,2	26	7	1,22
A/C	25-68	17	14	69	0,63	-	-	6,0	5,0	-	6,15	1,83	0,074	0,160	12,5	65,5	Traces	20	7	1,39
C ₁	68-90	17	16	67	0,37	-	-	6,1	5,1	-	7,02	2,37	0,074	0,28	14,5	67,3	Traces	20	7	1,26
C ₂	90-150	15	16	69	0,28	-	-	6,2	5,3	-	7,45	2,72	0,074	0,33	13,4	78,6	Traces	17	6	1,33
C ₃	150-200	12	5	83	0,13	-	-	6,5	5,6	-	5,3	1,8	0,074	0,30	7,75	96,4	Traces	8	5	1,38

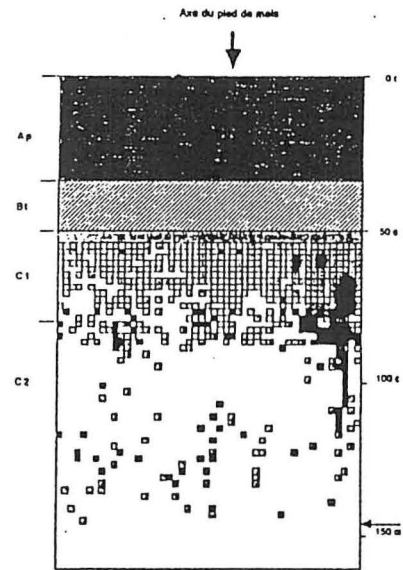


TRAITEMENT
FERTILISE



TEMOIN 0

CALCOSOL verticale de
Lagney 1993

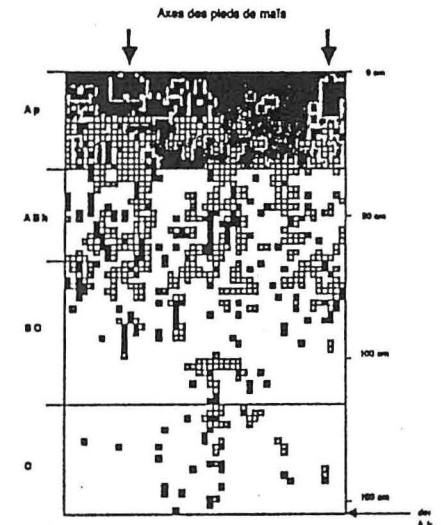


28 / 10 / 1992

Commune de MEYENHEIM (68)

PROFIL D'ENRACINEMENT DU MAÏS (maille 2 cm X 2 cm)

racines présentes à plus de 80 % dans la partie supérieure du profil n'ont pu

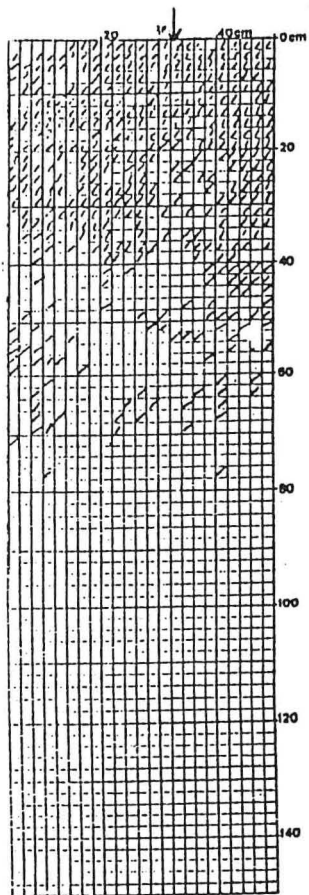


17 / 10 / 1991

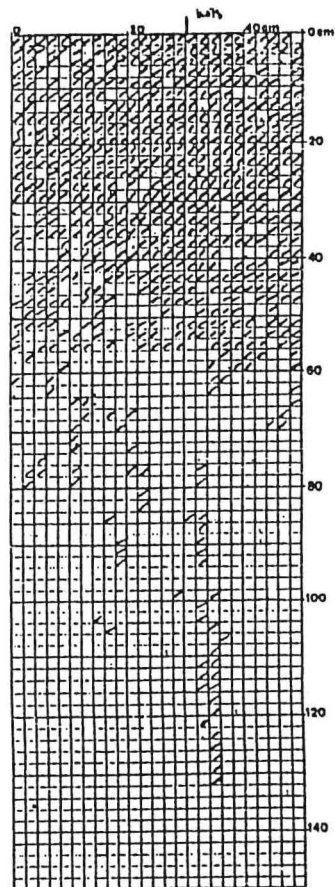
Commune d'OBERNAI (67) - Lycée agricole

PROFIL D'ENRACINEMENT DU MAÏS (maille 2 cm X 2 cm)

ANNEXE II-10' : PROFILS RACINAIRES

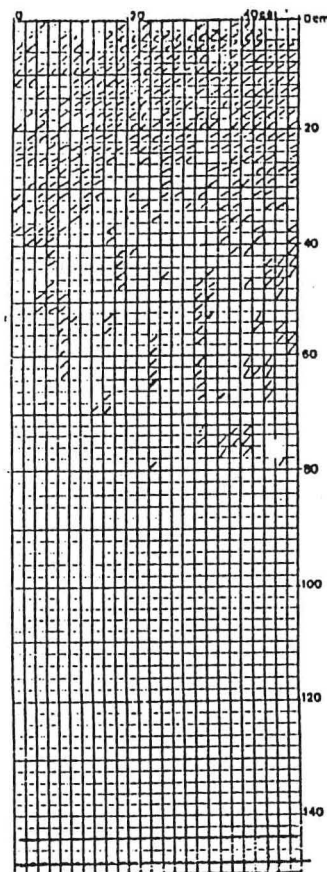


TEMOIN 0

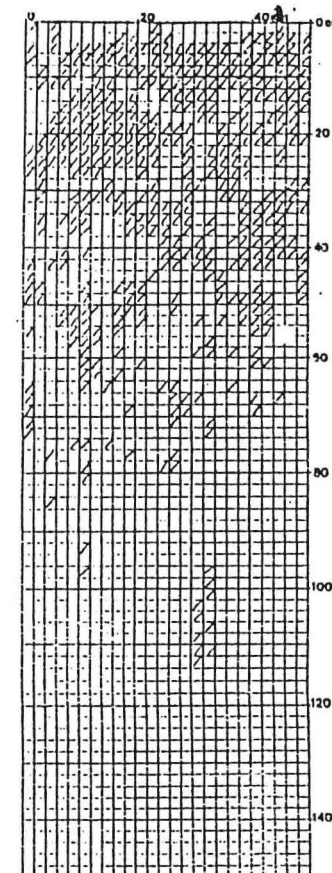


TRAITEMENT
FERTILISE

FLUVIOSOL de Dieulouard 1993



TEMOIN 0



TRAITEMENT
FERTILISE

NEOLUVISOL de la Bouzule 1993

ANNEXE II-10 : PROFILS RACINAIRES

Annexe II-11 : itinéraires techniques des essais de fertilisation

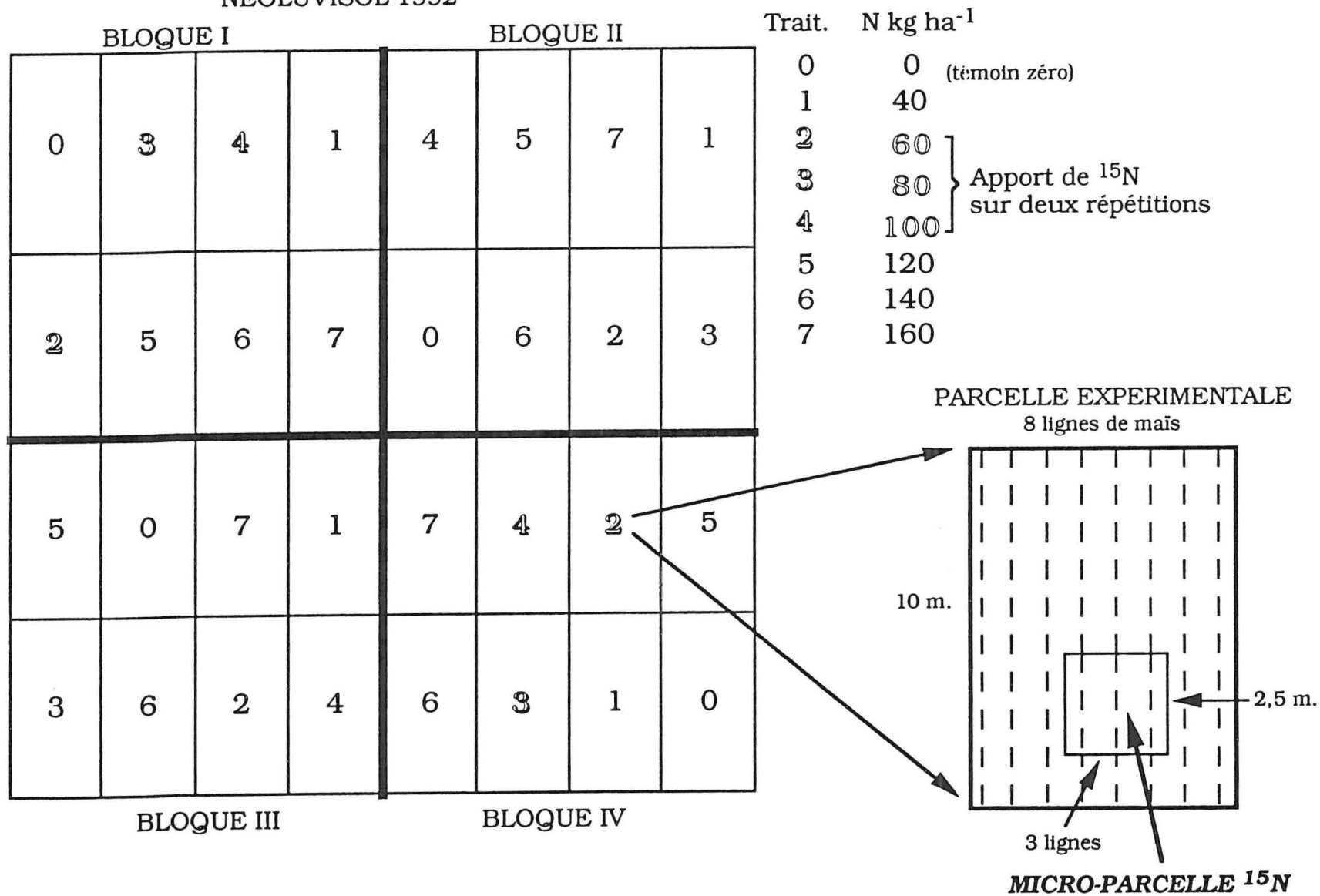
SITES	Année	Précédent		Semis maïs		Fumier* Date approxi- mative	Irrigation mm eau	Fumure de fond Kg ha ⁻¹		Apports azote date	Récolte
		culture	devenir paille	date	variété			P ₂ O ₅	K ₂ O		
1) Dommartin	1992	Maïs	enlevée	01/05/91	Anjou 18	Hiver	non	75	75	04/05/92 8-f (01/06/92)	03/09/92
2) Dieulouard	1993	Maïs	enfouie	20/04/93	Magister 11600	non	85	90	90	22/04/93 8-f (01/06/93)	20/09/93
3) Loisy	1992	Blé	enlevée	23/04/92	SEM 270	Déc. 91	non	75	75	12/05/92 8-f (15/06/92)	25/08/92
4) Noviant	1993	Maïs	enfouie	23/04/93	LG 22-08	Nov. 92	non	46	135	23/04/93 8-f (01/06/93)	03/09/93
5 ₁) Bouzule	1992	Escourgon	enlevée	07/05/92	SEM 270	Août 91	non	51	89	12/05/92 8-f (15/06/92)	08/09/92
5 ₂) Bouzule	1993	Maïs	enlevée	29/04/93	ANTARES	non	non	48	94	03/05/93 8-f (07/06/93)	16/09/93
6) Bouzule	1992	Escourgon	enlevée	07/05/92	SEM 270	Août 91	non	51	89	12/05/92 8-f (15/06/92)	08/09/92
7) Lagney	1993	Blé	enlevée	19/04/93	CELA	Août 90 Déc. 92	non	80	80	27/04/93 8-f (01/06/93)	06/09/93
8 ₁) Obernal	1992	Maïs	enfouie	22/04/92	DEA	non	non	70	105	30/04/92	22/09/92
8 ₂) Obernal	1993	Maïs	enfouie	21/04/93	DEA	non	non	0	0	29/04/93	27/09/93
9 ₁) Meyenheim	1992	Maïs	enfouie	21/04/92	DEA	non	297 mm	85	85	23/04, 19/05 et 03/06/92	23/09/92
9 ₂) Meyenheim	1993	Maïs	enfouie	21/04/93	DEA	non	237 mm	86	93	29/04, 18/05 et 09/06/93	27/09/93
10) Mexique	1992	Jachère	enfouie	10/06/92	VS-536	non	non	40	20	2-f (19/06/92)	22/09/92
11) Mexique		repousses								7-f (13/07/92)	

* apport approximatif 50 t ha⁻¹

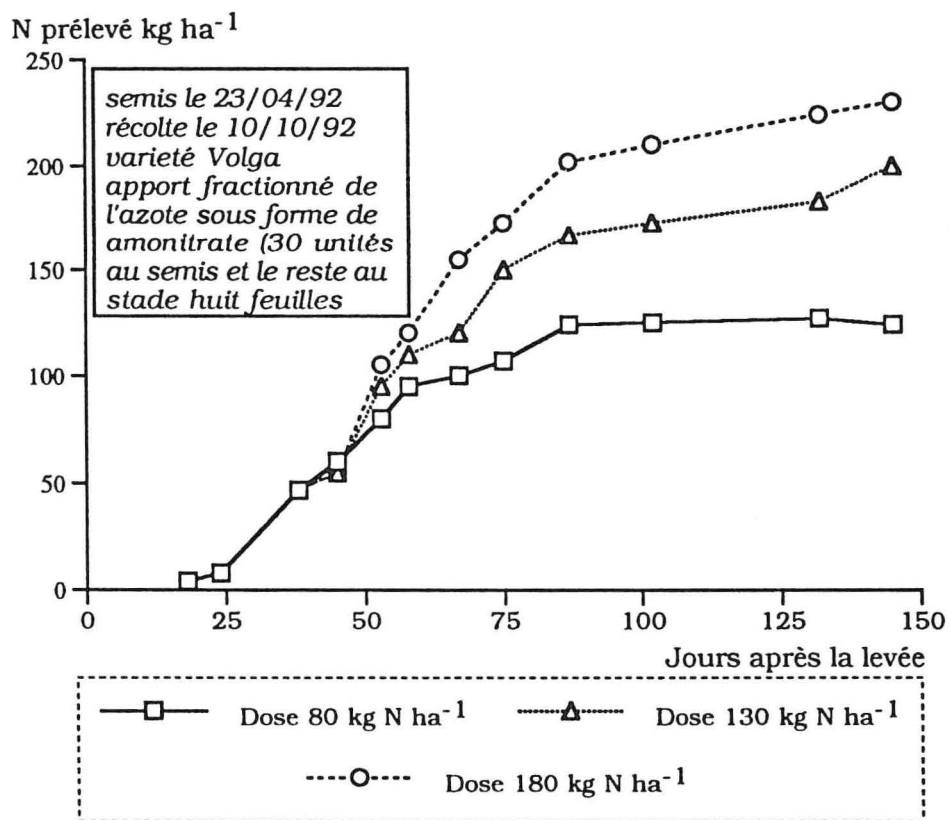
MAIS - PROTOCOLE AZOTE 15 - LA BOUZULE

NEOLUVISOL 1992

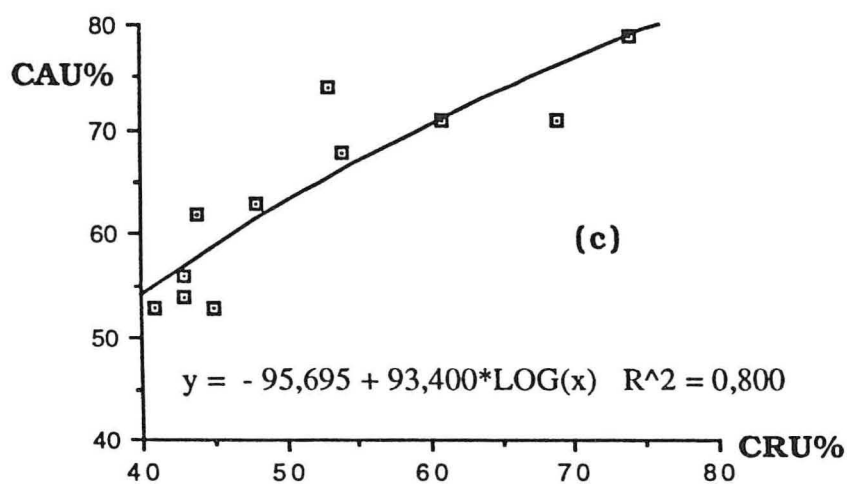
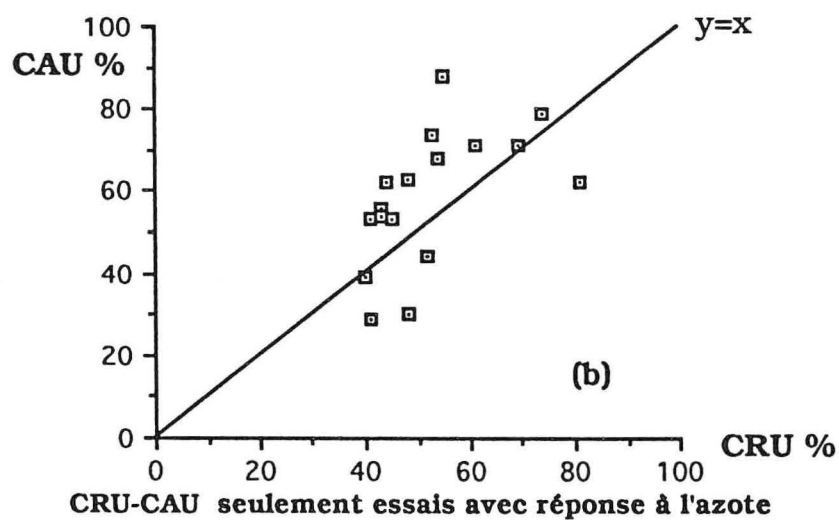
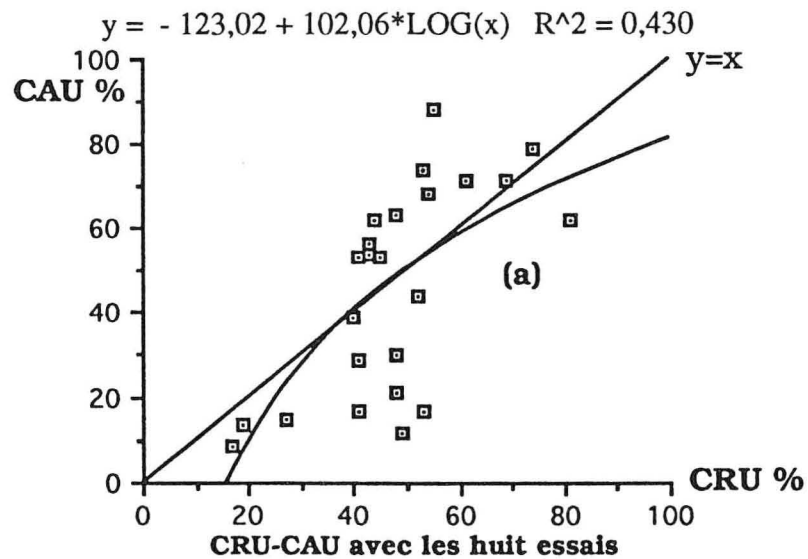
Azote apporté le 12 mai 1992



ANNEXE II-12 : EXEMPLE DU PROTOCOLE DE TERRAIN

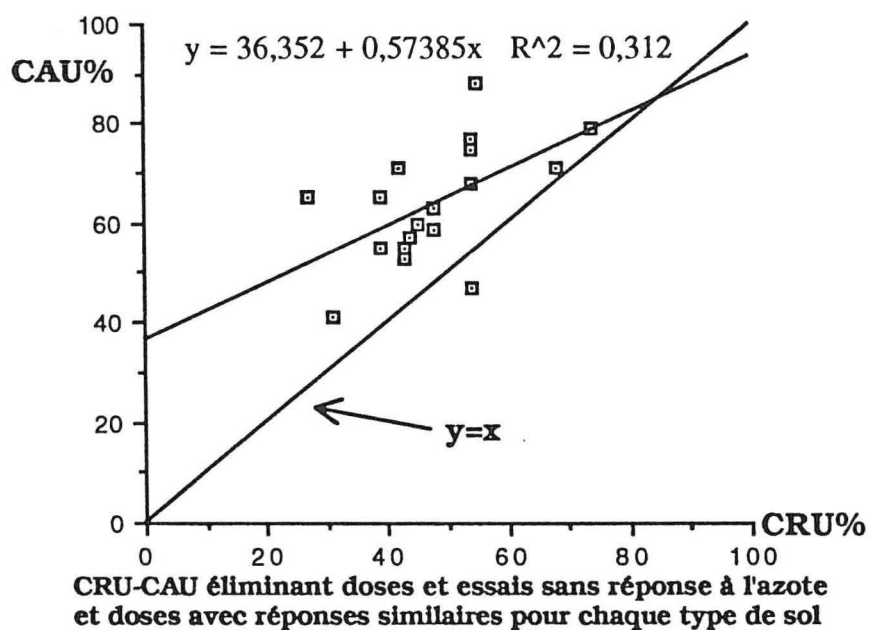
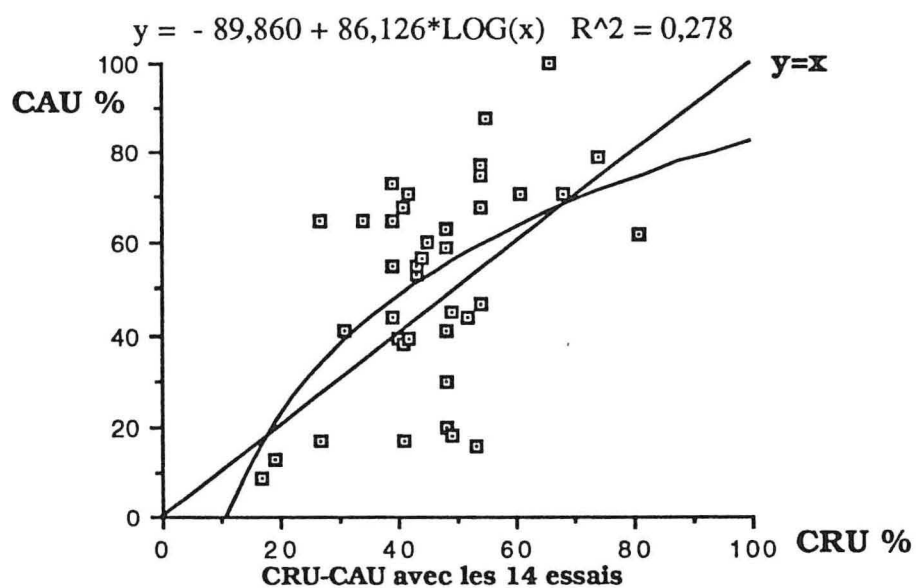


ANNEXE II-13 : prélèvement d'azote du maïs dans des essais de l'INRA-AGPM à Onard (d'après Blanc, 1992)



CRU-CAU éliminant doses sans réponse à l'azote et doses avec réponses similaires pour chaque type de sol

ANNEXE II-14 : essai de comparaison des CRU et CAU en trois situations (année culturale 1992)



ANNEXE II-14(suite) : essai de comparaison des CRU et CAU (années culturales 1992 et 1993)

Annexe II-15 : statut général du ^{15}N dans les huit types de sols sous conditions contrôlées
après incubation et après culture*

Sol		Après incubation							Total
		N min.	N-NO ₃	N-NH ₄	N org	NSAD	NSAnD	NnH	
1) FLUVIOSOL Dommartin	QN	110,2	106,2	4,0	1579,6	420	849,1	310,5	1689,8
	%E		13,51	0,64	0,2309	0,1131	0,2673	0,2905	
	^{15}N	14,33 (69,9)	14,3 (69,7)	0,03 (0,2)	3,647 (17,8)	0,475 (2,3)	2,27 (11,1)	0,902 (4,4)	17,98 (87,7)
2) CALCOSOL Loisy	QN	99,6	96,6	3,0	2143,1	574	1300,6	268,5	2242,7
	%E		12,98	0,33	0,1274	0,0732	0,1445	0,1601	
	^{15}N	12,51 (60,9)	12,5 (60,9)	0,01 (nég.)	2,73 (13,3)	0,42 (2,0)	1,88 (9,2)	0,43 (2,1)	15,24 (74,3)
3) NEOLUVISOL Bouzule	QN	65,6	64,8	0,8	1978,0	595	905,1	477,9	2043,6
	%E		14,45	0,27	0,1608	0,1529	0,1381	0,2134	
	^{15}N	9,42 (45,9)	9,4 (45,8)	0,02 (0,1)	3,18 (15,5)	0,91 (4,4)	1,25 (6,1)	1,02 (5,0)	12,6 (61,4)
4) PELOSOL Bouzule	QN	96,2	93,2	3,0	1996,6	658	859,6	479	2092,8
	%E		15,74	0,53	0,1543	0,0714	0,2140	0,1608	
	^{15}N	14,72 (71,8)	14,7 (71,7)	0,02 (0,1)	3,08 (15,0)	0,47 (2,3)	1,84 (9,0)	0,77 (3,7)	17,8 (86,8)
5) CALCOSOL Obernai	QN	86,6	84,5	2,1	1602,6	413	922,6	267	1689,2
	%E		15,38	0,67	0,2476	0,1211	0,2954	0,2790	
	^{15}N	13,02 (63,5)	13,0 (63,4)	0,02 (0,1)	3,97 (19,4)	0,50 (2,4)	2,725 (13,3)	0,745 (3,6)	16,99 (82,8)
6) FLUVIOSOL Meyenheim	QN	93,2	88,6	4,6	1201,6	322	614,6	265	1294,8
	%E		16,03	1,08	0,2634	0,1118	0,2986	0,3679	
	^{15}N	14,25 (69,5)	14,2 (69,2)	0,05 (0,3)	3,17 (15,5)	0,36 (1,8)	1,835 (8,9)	0,975 (4,8)	17,42 (84,9)
7) VERTISOL Mexique	QN	98,6	96,7	1,9	1092,6	364	523,6	205	1191,2
	%E		14,58	0,53	0,3218	0,1429	0,3361	0,6049	
	^{15}N	14,11 (68,8)	14,1 (68,8)	0,01 (0)	3,52 (17,1)	0,52 (2,5)	1,76 (8,6)	1,24 (6,0)	17,63 (86,0)
8) FLUVIOSOL Mexique	QN	115,3	113,0	2,3	1649,1	483	828,1	338	1764,4
	%E		14,87	1,74	0,1370	0,0994	0,1365	0,1923	
	^{15}N	16,84 (82,1)	16,8 (81,9)	0,04 (0,2)	2,26 (11,0)	0,48 (2,3)	1,13 (5,5)	0,65 (3,2)	19,1 (93,1)

* apport de 70 mg N kg⁻¹ sol marqué à E% = 29,3 ; soit Q¹⁵N = 20,51 mg ¹⁵N kg⁻¹ sol

QN : N total

%E : excès isotopique en %

^{15}N : Q¹⁵N en mg ¹⁵N kg⁻¹ sol (les valeurs entre parenthèse sont exprimées en % de Q¹⁵N apporté)

Annexe II-15 : suite...

Sol		Après culture						
		N org.	NSAD	NSAnD	NnH	N végétal aérien	N végétal racines	Total
1) FLUVIOSOL Dommartin	QN %E 15N	1312 0,1471 1,93 (9,4)	350 0,0743 0,26 (1,3)	749 0,1776 1,33 (6,5)	213 0,1596 0,34 (1,7)	69,7 1,191 0,83 (4,0)	27,6 1,014 0,28 (1,4)	1409,3 3,035 (14,8)
2) CALCOSOL Lotsy	QN %E 15N							
3) NEOLUVISOL Bouzule	QN %E 15N							
4) PELOSOL Bouzule	QN %E 15N							
5) CALCOSOL Obernai	QN %E 15N	1370 0,2051 2,81 (13,7)	388,5 0,0978 0,38 (1,9)	714 0,2367 1,69 (8,2)	267,5 0,2766 0,74 (3,6)	65,2 1,319 0,86 (4,2)	24,1 1,079 0,26 (1,3)	1459,3 3,93 (19,2)
6) FLUVIOSOL Meyenheim	QN %E 15N	1061 0,1866 1,98 (9,7)	287 0,0766 0,22 (1,1)	511 0,1977 1,01 (4,9)	263 0,2852 0,75 (3,7)	67,4 1,231 0,83 (4,0)	23,1 0,996 0,23 (1,1)	1151,5 3,04 (14,8)
7) VERTISOL Mexique	QN %E 15N	1089 0,1938 2,11 (10,3)	259 0,1004 0,26 (1,3)	602 0,2193 1,32 (6,4)	228 0,2325 0,53 (2,6)	62,7 1,292 0,81 (3,9)	25,1 1,076 0,27 (1,3)	1176,8 3,18 (15,5)
8) FLUVIOSOL Mexique	QN %E 15N	1420 0,0796 1,13 (5,5)	490 0,0469 0,23 (1,1)	707 0,1033 0,73 (3,6)	223 0,0762 0,17 (0,8)	66,7 1,184 0,79 (3,9)	27,4 1,058 0,29 (1,4)	1514,1 2,21 (10,8)

**AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE
DE LORRAINE**

o o o

BIU NANCY
Service Commun de Documentation
INPL
2, avenue de la Forêt de Haye - B.P. 3
54501 VANDOEUVRE Cédex FRANCE

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

**Monsieur GANRY Francis, Directeur de Recherche, CIRAD
Montpellier,
Monsieur GUIRAUD Gérard, Directeur de Recherche, CEA
Cadarache
St Paul les Durance.**



Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur PALMA-LOPEZ David

à soutenir devant l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

**"Contribution à l'étude des potentialités agricoles et des flux azotés
dans divers sols cultivés en maïs".**

en vue de l'obtention du titre de :

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
LORRAINE**

Spécialité : **"SCIENCES AGRONOMIQUES"**

Fait à Vandoeuvre le, **11 Mai 1994**

Le Président de l'I.N.P.L.,

M. LUCIUS

RESUME

Ce mémoire a pour but principal d'esquisser une démarche afin de déterminer la potentialité agricole des sols pour une culture donnée et les relations de cette potentialité avec le devenir de l'azote engrais lors du cycle sol-plante. A partir d'études pédologiques de secteurs de références situés en Lorraine et à l'aide de classifications techniques des sols nous avons mis en évidence les facteurs limitants de la production ; ces derniers ont été comparés avec les rendements agricoles obtenus lors de trois années climatiques consécutives ; il a été possible de définir après étude fréquentielle des paramètres climatiques la potentialité agricole des sols pour une année donnée. De plus il est nécessaire de tenir compte de l'hétérogénéité spatiale pour établir des plans de potentialités parcellaires. Le suivi des teneurs en nitrates dans les différents sols a mis en évidence les relations entre potentialités et risques d'entraînement des nitrates. L'emploi du traceur ^{15}N révèle que les coefficients d'utilisation de l'azote engrais varient par rapport aux types de sols sans que l'on observe une relation précise entre CRU et CAU. Nous démontrons que les fournitures azotées des sols estimées à l'aide d'un témoin zéro présentent des relations étroites avec les valeurs Ndfs et A malgré des interactions avec l'engrais apporté. En conditions contrôlées l'étude du cycle interne de l'azote 15 démontre l'absence d'effet ANI réel ; elle indique des cinétiques des processus d'organisation-reminéralisation entre les divers compartiments azotés liés au comportement bio-physico-chimique des sols , enfin elle montre que la fraction NSAnD constitue le siège principal de ces mécanismes, mais que la fraction NnH joue un rôle non négligeable pour certains types de sols.

SUMMARY

This study is aimed at establishing a technical approach in order to determine, for a given culture, the relationships between soil agricultural potentialities and fate of nitrogen fertilizer implicated through soil-plant cycle. From pedological studies in reference stations of Lorraine and by means of soil technical classifications, we emphasized the limitant factors on crop productions. By comparison of these limitant factors to crop yields, it was possible to definite, after studying the frequency of climatic parameters, the agricultural potentiality for a given year. Furthermore, the spatial heterogeneity of soils have to be taken into account to plan plot potentialities. Nitrate levels survey in different soils put in evidence close relationship between potentialities and nitrate leaching. The use of ^{15}N demonstrated that the Real Coefficient of Utilization(RCU) was soil type dependent without, nevertheless, an obvious link to the Apparent Coefficient of Utilization(ACU). We clearly demonstrated that nitrogen supplies represented by the nitrogen taken up by plant without receiving fertilizer "témoin zéro" were closely related to Ndfs and A values, despite some interactions existed when N fertilizer added(ANI effect). Under controlled conditions study, we observed no real ANI effect; the immobilization-remineralization processes were essentially linked to physical and chemical characteristics of soils and the NSAnD fraction corresponded to the main biological seat of these processes as also did the NnH fraction in some studied soils.